

**Das Darmstädter Verfahren (EVITA)
zum Testen und Bewerten
von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen**

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der
Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Jens Hoffmann

aus Witten

Berichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Heiner Bubb
Tag der Einreichung:	17.06.2008
Tag der mündlichen Prüfung:	29.09.2008

Darmstadt 2008

D17

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner, dem Leiter des Fachgebiets Fahrzeugtechnik. Zu seiner wissenschaftlichen Betreuung meiner Arbeit gehörten die kritisch hinterfragenden Diskussionen, die mich zum Weiterdenken motivierten und mir Unterstützung für Entscheidungen in komplexen Situationen gaben.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Heiner Bubb, dem Ordinarius des Lehrstuhls für Ergonomie an der TU München, danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Bei Herrn Prof. em. Dr.-Ing. Bert Breuer, dem ehemaligen Leiter des Fachgebiets Fahrzeugtechnik, bedanke ich mich für seine kritischen Fragen und Hinweise in meinen Doktorandenseminaren.

Der Ursprung der Arbeit liegt in einem 2005 gestarteten Kooperationsprojekt mit Honda R&D Deutschland GmbH aus Offenbach am Main mit dem Titel „Fahreralarmierung in Notbremsituationen“. Den Herren Dr.-Ing. Jens Gayko, Sven Bone und Falko Waibel danke ich für die hervorragende Kooperation und die zahlreichen fachlichen Diskussionen.

Nach dem Vorliegen des Darmstädter Test- und Bewertungsverfahrens mit EVITA ergab sich in einer Kooperation mit der Forschungsinitiative „aktiv“, bestehend aus Vertretern der Firmen Audi, Bosch, BMW, Siemens VDO, MAN und Opel, die Möglichkeit zur Anwendung des Verfahrens auf automatisierte Notbremsungen. Herzlichen Dank für die gelungene Zusammenarbeit.

Allen Mitarbeitern des Fachgebiets, einschließlich den Mitarbeitern der mechanischen und elektronischen Werkstatt und des Sekretariats, danke ich für die äußerst angenehme und kollegiale Atmosphäre. Viele meiner Kollegen sind Freunde geworden.

Die Bearbeitung der beiden umfangreichen Projekte wäre ohne die tatkräftige Hilfe zahlreicher Diplom- und Studienarbeiter sowie wissenschaftlicher Hilfskräfte nicht möglich gewesen. Herzlichen Dank für Euer Mitwirken.

Ausdrücklicher Dank gebührt meiner Verlobten Sabine. Ihre ausgeglichene, soziale Art hat mir geholfen, in den letzten Jahren die wichtigen Aspekte im Leben zu berücksichtigen und genau die richtige Dosis Arbeit anzuwenden. Zu guter Letzt gebührt mein Dank meinen Eltern Erika und Friedhelm und meiner Schwester Anke. Die Unterstützung für mein Dissertationsvorhaben war jederzeit hervorragend.

Jens Hoffmann

Darmstadt, Juni 2008

„Einmal EVITA fahren sagt mehr als tausend Worte“

Dr. Peter Zahn, BMW

Inhalt

1	Einleitung.....	1
1.1	Methodik und Aufbau der Arbeit.....	2
1.2	Ursachen für Frontalkollisionen	3
2	Stand der Forschung und der Technik.....	9
2.1	Frontalkollisionsgegenmaßnahmen	9
2.2	Test- und Bewertungsverfahren für Frontalkollisionsgegenmaßnahmen	12
2.2.1	Methoden des realen Fahrversuchs.....	13
2.2.2	Methoden zur Bestimmung der Einschätzung durch Probanden.....	15
2.3	Nutzen von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen.....	16
2.4	Fazit zum Stand der Forschung	17
3	Zielsetzung der Arbeit.....	19
3.1	Ermittlung des Forschungsbedarfs	19
3.2	Zieldefinition	19
3.3	Postulat	20
4	Test- und Bewertungsverfahren mit EVITA.....	21
4.1	Ziele und Anforderungen	21
4.2	EVITA.....	21
4.2.1	Aufbau.....	22
4.2.2	Versuchsablauf	24
4.2.3	Leistungsdaten	25
4.2.4	Ablenkung des Probanden	26
4.2.5	Gefährdungen von Versuchsteilnehmern	28
4.3	Versuchsfahrzeug.....	28
4.3.1	Messkonzept im Versuchsfahrzeug.....	28
4.3.2	Frontalkollisionsgegenmaßnahmen im Versuchsfahrzeug.....	31
4.4	Bewertungskriterien.....	32
4.4.1	Wirksamkeit von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen.....	32
4.4.2	Beurteilungszeitraum	32
4.4.3	Bewertungskriterien.....	35
4.4.4	Vergleiche von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen	39
4.4.5	Auswertungsverfahren	39

5 Hypothesenbildung	42
5.1 Wirksamkeit	42
5.2 Störungsmaß	43
5.3 Reaktionszeiten	44
5.4 Korrelationen	44
6 Entwicklung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen.....	45
6.1 Grundlagen zur Entwicklung von FKGM	45
6.2 EVITA-Entwicklungsmethodik für FKGM	48
6.3 Untersuchte Frontalkollisionsgegenmaßnahmen.....	52
6.3.1 Sitzvibration & Symbol	52
6.3.2 Soundausgabe	53
6.3.3 Bremsruck	54
6.3.4 Teilverzögerung	55
6.3.5 Vollverzögerung	56
7 Probandenversuche.....	58
7.1 Grundlagen für Probandenversuche	58
7.2 Probandenkollektiv	60
7.3 Versuchsablauf.....	62
7.3.1 Anforderungen an die Festlegung der Versuchsparameter	64
7.3.2 Versuchsparameter Abstand, Geschwindigkeit und Verzögerung	65
7.3.3 Seitenversatz und Eingewöhnung	67
7.3.4 Notbremsungen	68
7.3.5 Fehlauslösung	68
8 Ergebnisse der Probandenversuche	69
8.1 Wirksamkeit.....	69
8.2 Störungsmaß	73
8.3 Reaktionszeiten.....	78
8.4 Korrelationen	87
8.5 Abdeckungsrate und Informationsgehalt.....	89
8.6 Fazit zu den Ergebnissen der Probandenversuche.....	90
9 Diskussion	93
9.1 Übertragbarkeit	93
9.2 Fehler	94
9.3 Trennschärfe des Verfahrens.....	97
9.4 Validierung des Überraschungseffekts	98

10 Zusammenfassung.....	101
11 Ausblick.....	103
12 Anhang	105
13 Literaturverzeichnis.....	112

Formelzeichen und Indizes

Lateinische Buchstaben:

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
D	m/s ²	Deceleration, Beschleunigung
F	N	Kraft
N	l	Anzahl, Stichprobenumfang
m	kg	Masse
T	s	Zeit
v	m/s	Geschwindigkeit

Griechische Buchstaben:

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
μ	./.	Reibbeiwert
τ	s	Zeitlücke zum voraus Fahren
Δ	-	Delta/Differenz

Indizes:

Zeichen	Bezeichnung
B	Beurteilungszeitraum
EGO	eigenes
$G-R$	Gesamtreaktionszeit
$mech$	mechanisch
$trans$	translatorisch

Abkürzungsverzeichnis

AARU	Audi Accident Research Unit
ABS	Anti-Blockier-System
ACC	Adaptive Cruise Control
AGB	Automatische Gefahrenbremsung
ANB	Automatische Notbremse
APIA	Active Passive Integration Approach
ARP	Accident Reduction Potential
BA	Bremsassistent
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
CAN	Controller Area Network
CMBS	Collision Mitigation Brake System
Destatis	Statistisches Bundesamt
EHB	Elektro-Hydraulische Bremse
ESP	Elektronisches-Stabilitäts-Programm
Euro NCAP	European New Car Assessment Program
EVITA	Experimental Vehicle for Unexpected Target Approach
FA	Fehlalarm
FAS	Fahrerassistenzsystem
FGKM	Frontalkollisionsgegenmaßnahme(n)
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FZD	Fahrzeugtechnik Darmstadt
GPS	Global Positioning System
HBZ	Hauptbremszylinder
HMD	Head-Mounted-Display
MAIS	Maximum Abbreviated Injury Scale
MuF	Tagung Mensch und Fahrzeug an der TU Darmstadt
PSA	Peugeot-Citroën (Peugeot Société Anonyme)
Radar	Radio Detecting and Ranging
StVO	Straßenverkehrsordnung
Temp	Temperatur
TTC	Time-To-Collision
TUD	Technische Universität Darmstadt
VR	Virtual Reality

1 Einleitung

Im Jahr 2006 ereigneten sich auf deutschen Straßen 328.000 Unfälle mit Personenschäden. 30 % davon waren Unfälle mit Frontalkollisionen, wobei 1.500 Menschen getötet und etwa 142.000 verletzt wurden.¹ Es ist ein erklärtes Ziel der EU, die Anzahl der Unfälle weiter zu reduzieren.² Da die passive Sicherheit der Fahrzeuge mittlerweile einen sehr hohen Stand erreicht hat, erscheint eine weitere Reduktion nur durch die Anwendung von Fahrerassistenzsystemen der aktiven Sicherheit erreichbar zu sein.

Bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen (FAS) für die Vermeidung von Unfällen sind geeignete Testmethoden für objektive Bewertungen erforderlich. Für eine größtmögliche Übertragbarkeit der Versuche sind realitätsnahe und repräsentative Szenarien darzustellen. Dabei gilt bisher, dass eine Vergrößerung der Realitätsnähe mit einer enormen Vergrößerung des Aufwands einhergeht. Die Testmethoden für in kritischen Situationen unterstützende FAS müssen vor allen Dingen sicher für die beteiligten Versuchspersonen, aber auch reproduzierbar sein. Da bisher geeignete Methoden fehlten, ist dieser Test von Antikollisionssystemen eine große Herausforderung.

Wie führende Forscher und Entwickler von Fahrerassistenzsystemen proklamieren, sind bei der Entwicklung von Systemen zur Kollisionsvermeidung oder Kollisionsminderung sowohl die Wirksamkeit als auch die Akzeptanz durch den Nutzer zu bewerten. Die Forderung nach einer hohen Wirksamkeit leitet sich ab aus dem Bestreben, die Zahl der Verletzten und Getöteten zu reduzieren. Die Akzeptanz, und somit auch die Entscheidung zum Kauf von Antikollisionssystemen, ist vom Nutzer abhängig.

Aufgrund der Gefahren bei der Erzeugung von realen Auffahrunfällen werden Untersuchungen bisher hauptsächlich im Fahrsimulator durchgeführt. Mit dem Darmstädter Mess- und Bewertungsverfahren mit dem Versuchswerkzeug EVITA (Experimental Vehicle for Unexpected Target Approach) wird im realen Fahrversuch mit Probanden³ die Güte von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen beurteilt.

¹ Destatis, Unfallgeschehen 2006, 2007

² E-Safety-Programm der EU

³ Versuchsperson, lateinisch probare = prüfen

1.1 Methodik und Aufbau der Arbeit

Der Ausgangspunkt des methodischen Vorgehens sind Frontalkollisionen im Straßenverkehr. Im folgenden Unterkapitel 1.2 werden typische Unfallszenarien und deren Ursachen erläutert. Daraus wird der Bedarf an Frontalkollisionsgegenmaßnahmen motiviert. Die Arbeit befasst sich sowohl mit der Entwicklung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen (FKGM) als auch mit der Bewertung der entwickelten Maßnahmen. Dazu werden im Kapitel 2 zunächst der Stand der Technik von Test- und Bewertungsverfahren dargestellt. Anschließend wird nach der Definition des Forschungsbedarfs im Kapitel 3 das neue Bewertungsverfahren im Kapitel 4 dargestellt. Des Weiteren wird der Stand der Technik zu Frontalkollisionsgegenmaßnahmen gezeigt (ebenfalls Kapitel 2) und im Kapitel 6 eine Methodik zum Vorgehen im Entwicklungsprozess vorgestellt. Die Überprüfung der Güte der Gegenmaßnahmen und des neu definierten Verfahrens erfolgt mit Hypothesen (Inhalt des Kapitel 5) in Probandenversuchen, deren Grundlagen im Kapitel 7 vermittelt werden. Die Ergebnisse der Versuche sind im Kapitel 8 dargestellt, woraus sich die Validierung des Verfahrens (Kapitel 9) ableitet.

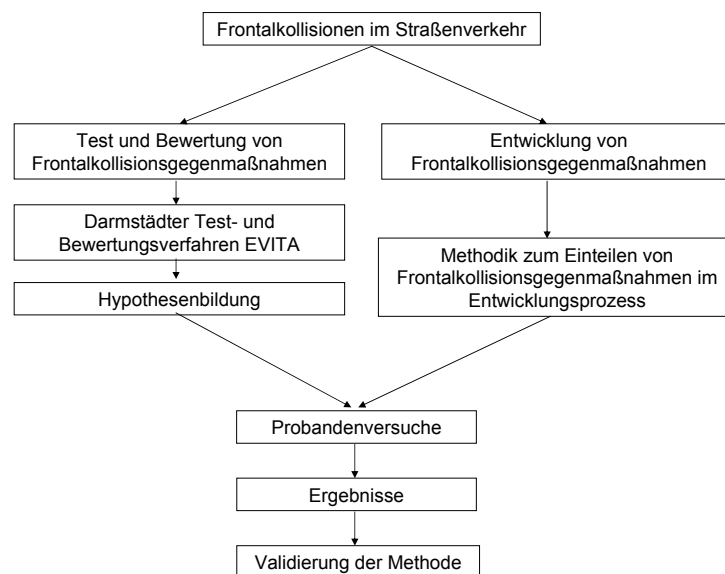


Bild 1-1: Struktur des Vorgehens

1.2 Ursachen für Frontalkollisionen

Eine erste Nennung der Unfallzahlen in Deutschland wurde in der Einleitung durchgeführt: 30 % der 328.000 Unfälle im Jahr 2006 waren Frontalkollisionen. Die Einteilung

der Unfalltypen des Statistischen Bundesamts lässt keine detaillierte Interpretation der Daten zu. Zu diesem Zweck sind In Depth Analysen erforderlich. Neben den Daten aus der GIDAS-Datenbank⁴ liegen Untersuchungsergebnisse aus den USA vor. Tabelle 1-1 zeigt drei unterschiedliche Unfallszenarien bei Frontalkollisionen aus einer In Depth Untersuchung in den USA.

Tabelle 1-1: Unfallszenarien bei Frontalkollisionen aus einer In Depth Analyse in den USA⁵

Nr.	Szenario	Relative Häufigkeit
1	Vorausfahrendes und folgendes Fahrzeug fahren mit konstanter Geschwindigkeit auf einer geraden Straße, das vorausfahrende Fahrzeug verzögert.	37 %
2	Das folgende Fahrzeug fährt mit konstanter Geschwindigkeit auf einer geraden Straße und fährt auf ein zum Stehen gekommenes Fahrzeug auf.	30,2 %
3	Das folgende Fahrzeug fährt mit konstanter Geschwindigkeit auf einer geraden Straße und fährt auf ein mit konstanter Geschwindigkeit langsamer fahrendes Fahrzeug auf.	14,1 %
-	Weitere	18,7 %

Die Tabelle zeigt, dass über 80 % der untersuchten Unfälle bei einfach erscheinenden Szenarien geschehen. Bild 1-2 zeigt die Hauptfehler der Fahrzeugführer in Auffahrunfallsituationen.

⁴ German In Depth Accident Study

⁵ Wiacek, C.: Characteristics in Rear-End-Crashes, 1999

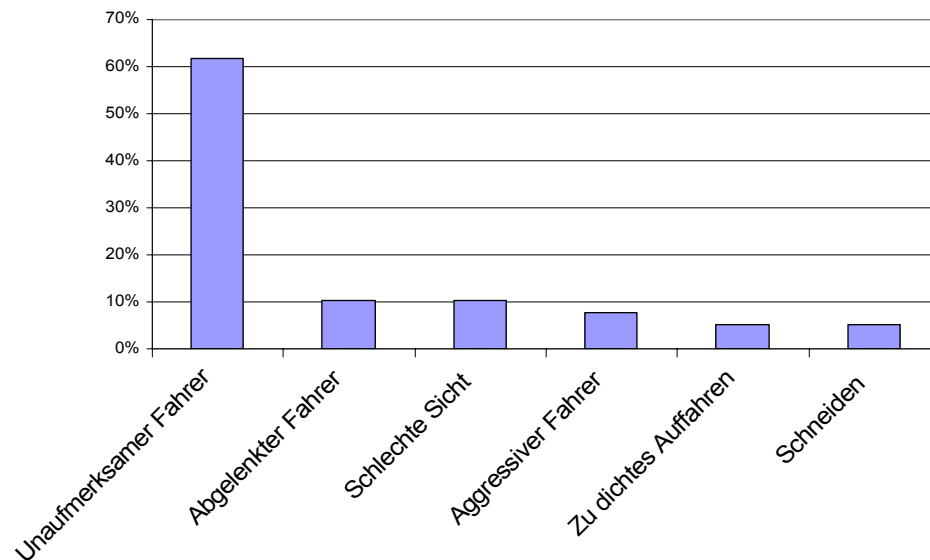


Bild 1-2: Hauptfehler der Fahrzeugführer in Auffahrunfallsituationen (adaptiert) ⁶

Nach dieser amerikanischen In Depth Analyse repräsentiert ein unaufmerksamer oder abgelenkter Fahrer in Auffahrunfällen zusammen über 70 % der Ursachen der in den USA jährlich registrierten Auffahrunfälle. Diese stellen 19,5 % der Gesamtanzahl der Unfälle. Untersucht wurden alle häufig vorkommenden Unfälle mit einer hohen Verletzungsrate, bei denen ein Kollisionswarnsystem die Situation detektieren könnte und eine Warnung den Unfall hätte abschwächen oder vermeiden können. Im Rahmen der Untersuchung zu Unfallszenarien (siehe Tabelle 1-1) wurden die einem Unfall vorausgehenden Fahrerhandlungen analysiert (siehe Tabelle 1-2).

Tabelle 1-2: Fahrerreaktionen vor einem Unfall für die erstellten Unfallszenarien ⁷

Fahrerhandlung	Nr.1	Nr.2	Nr.3
Keine Handlung	81,4 %	78,4 %	83,8 %
Bremmung	12,2 %	15,5 %	8,1 %
Lenken	1,1 %	2,2 %	1,7 %
Andere	-	-	-

Die Tabelle zeigt, dass in allen drei einfach erscheinenden Szenarien in rund 80 % der Fälle von den Fahrzeugführern keine Handlung zum Vermeiden des Unfalls ausgeführt

⁶ LeBlanc, D.: Crash Alert Timing, 2001

⁷ Wiacek, C.: Characteristics in Rear-End-Crashes, 1999

wurde. Eine ähnliche Tendenz zeigt Bild 1-3, bei dem anhand deutscher Zahlen die Fahrerreaktionen zum Vermeiden eines Unfalls aufgelistet sind.

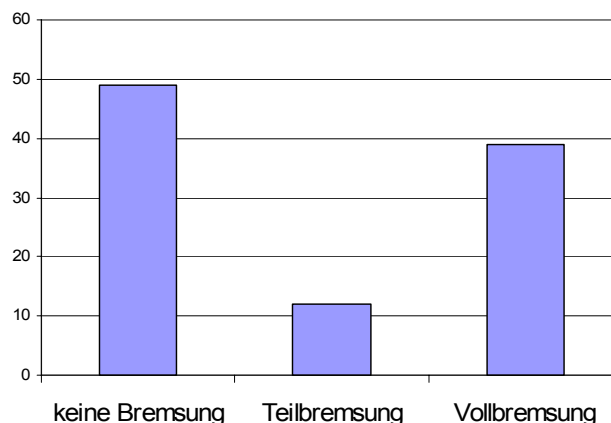


Bild 1-3: Fahrerreaktionen vor einem Unfall⁸

Gemäß den dargestellten Ergebnissen zum Fahrerverhalten bei Auffahrunfällen, nach dem Gesamtverband der deutschen Versicherer⁹, bremsen Fahrzeugführer in fast 50 % der Unfälle vor einem Aufprall nicht. Lediglich knapp 40 % der Personen führen die notwendige Notbremsung aus, 12 % nur eine Teilbremsung. Nach Erhebungen von Destatis sind 85 % aller Unfallursachen auf ein Fehlverhalten der Fahrzeugführer zurückzuführen.¹⁰ Bei einer technischen, medizinischen und verkehrspsychologischen Analyse der Audi Accident Research Unit (AARU) werden menschliche Unfallursachen nach Rasmussen¹¹ klassifiziert. Die Ergebnisse aus nahezu 700 Unfällen zeigen, dass 65 % der Ursachenfaktoren zu Informationsfehlern gehören. Bei einem Informationsfehler hat ein Fahrer eine relevante Information zu spät oder gar nicht wahrgenommen.¹²

⁸ Knoll, P.: Predictive Safety System, 2004

⁹ Statistik des Gesamtverbands der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., 2001

¹⁰ Destatis, Unfallgeschehen 2006, 2007

¹¹ Rasmussen, J.: Human Errors, 1982, S. 311-333

¹² Graab, B.: AARU Verkehrsunfälle, 2007

In der allgemeinen Psychologie werden für die Gesetzmäßigkeiten der menschlichen Informationsverarbeitung sehr differenzierte Vorstellungen erarbeitet. Zulässige Vereinfachungen sind nach Jürgensohn und Timpe eine Beschränkung auf die Bereiche Informationsaufnahme, Informationsverarbeitung im engeren Sinne und einem System zur Handlungsausführung.¹³

Nach dem Modell von Wickens¹⁴ können die menschlichen Informationsübertragungsprozesse wie in Bild 1-4 (zusammengefasst nach Johanssen¹⁵) dargestellt werden. Das Modell beschreibt die Aufnahme von Reizen durch die Sinnesorgane und die Erzeugung von Ausgangsgrößen durch Körperbewegungen.

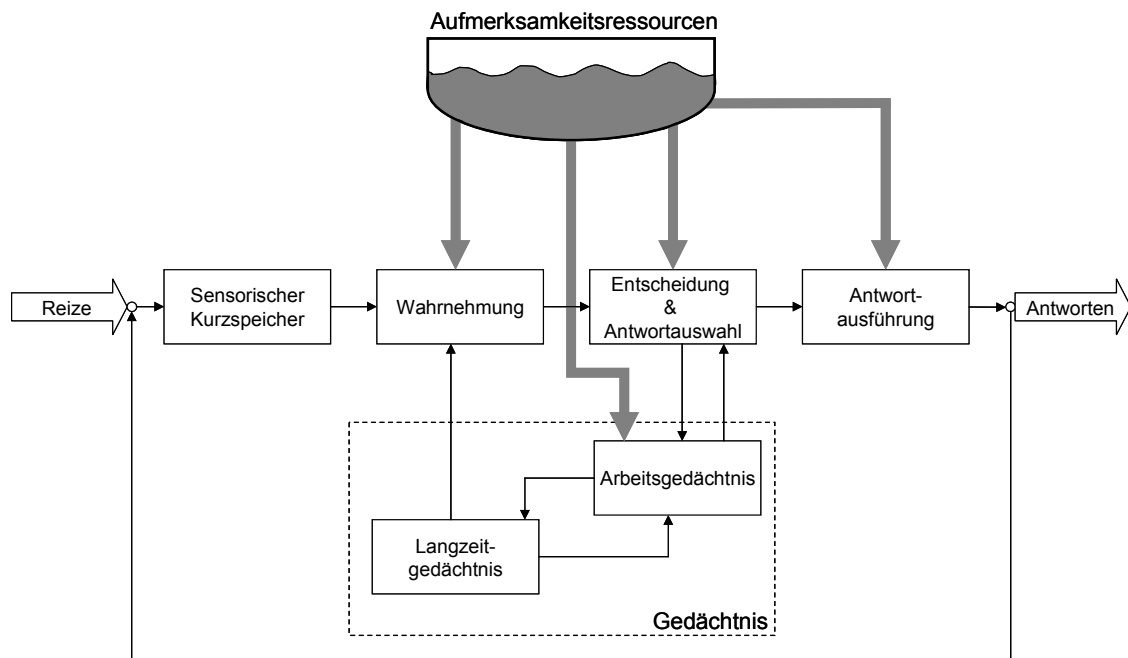


Bild 1-4: Modell der menschlichen Informationsverarbeitung und Aufmerksamkeitsverteilung nach Johanssen

Eingangsgrößen, zu denen auch die Warnung durch eine Frontalkollisionsgegenmaßnahme gehört, stellen einen Reiz für die Sinnesorgane des Menschen dar. Die Intensität des Reizes muss oberhalb einer sinnesorgan-spezifischen Reizschwelle und sollte unterhalb der Schmerzschwelle liegen. Die Reize werden in den sensorischen Kurzspeicher aufgenommen, dessen Hauptzweck darin besteht, die aufgenommenen Reize für

¹³ Jürgensohn, Th.: Kraftfahrzeugführung, 2001, S. 16

¹⁴ Wickens, C.: Engineering Psychology, 2000

¹⁵ Johanssen, G.: Informationsübertragungsprozesse, 1993, S.111

die Wahrnehmungsvorgänge bereitzuhalten. Im Gegensatz zur Reizaufnahme sind bei der Wahrnehmung höhere Gehirnareale beteiligt. Charakteristisch für die Wahrnehmung sind die Mustererkennung und die Merkmalsbildung. Nach der Wahrnehmung entscheidet der Mensch zwischen möglichen Handlungsalternativen und wählt eine Antwort als Reaktion auf die Reize aus. Dabei erfolgt ein ständiger Informationsaustausch mit Arbeits- und Langzeitgedächtnis. Das Arbeitsgedächtnis wird auch Kurzzeitgedächtnis genannt, worin nicht nur die Information selbst, sondern auch deren Interpretation festgehalten wird. Speicherung im und Zugriff auf das Langzeitgedächtnis dauern erheblich länger als beim Kurzzeitgedächtnis. Für die Antwortauswahl steht wiederum ein Speicher mit abgelegten passenden Körperbewegungen zur Verfügung. Der Prozess endet mit der Antwortausführung. Für Wahrnehmung, Entscheidung, Antwortauswahl sowie Arbeitsgedächtnis und Antwortausführung stehen dem Menschen Aufmerksamkeitsressourcen zur Verfügung. Er kann diese Ressourcen frei verteilen. Eine detaillierte Aufteilung der menschlichen Handlungen und Fehlhandlungen ist Aufgabenbereich der Ergonomie und wird beispielsweise von Zimmer¹⁶ aufgelistet. Nach Johanssen und Sheridan¹⁷ besitzt der Mensch zum Fahrzeugführen die Fähigkeit zur Vorhersage (prediction) und zur Vorausschau (preview). Dabei werden zukünftige Situationen aufgrund von gegenwärtigen Informationen geschätzt. Wird die zukünftige Situation vom Fahrer als unbedenklich eingestuft, kann er dazu neigen, seine Aufmerksamkeitsverteilung vom Fahrzeugführen zu andern Reizen hin zu verlagern. Tritt in einem Moment mit ungünstiger Aufmerksamkeitsverteilung ein plötzliches und unerwartetes Ereignis ein, können menschliche Fehlhandlungen entstehen und als Resultat möglicherweise Unfälle.¹⁸ Zomotor und Kiesewetter haben gezeigt, dass Fahrer in Notbremsituationen nicht die notwendigen Bremsbetätigungsgeschwindigkeiten und -kräfte aufbringen.^{19,20} Diese Erkenntnisse führten zur Entwicklung des Bremsassistenten (BA). Rath und Knechtges²¹ beschreiben die beim Menschen in Notbremsituationen ablaufenden physiologischen Vorgänge: Über die Ausschüttung von Adrenalin wird das Großhirn ausgeschaltet, das Kleinhirn übernimmt die Steuerung und reagiert mit gelernten Handlungsweisen oder instinktiv nach dem Prinzip „fight, flight or freeze“.

¹⁶ Jürgensohn, Th.: Kraftfahrzeugführung, 2001, S. 45f.

¹⁷ Sheridan, T.B.: General Model, 1976, Seiten 271-281

¹⁸ Johanssen, G.: Informationsübertragungsprozesse, 1993

¹⁹ Zomotor, A.: Fahrerverhalten, 1987

²⁰ Kiesewetter, W.: Bremsassistent von Mercedes, 1997

²¹ Rath, S.: Active Safety, 1995, S. 35-42 nach Busch, S.: Bewertungsmethodik für FAS, 2004

Allgemein leiten sich zwei Ziele für warnende Fahrerassistenzsysteme (FAS) ab:

1. Den Menschen bei der Verteilung der Aufmerksamkeitsressourcen zu unterstützen, um die Kollision durch schnelle Wahrnehmung der Verkehrssituation zu vermeiden und
2. den Menschen bei der Entscheidung und Antwortauswahl durch die Art der Warnung zu unterstützen.

Daraus folgt die Fragestellung, wie die für den oben genannten Zweck entwickelten Systeme auf ihre Leistungsfähigkeit hin überprüft werden können.

2 Stand der Forschung und der Technik

Im vorliegenden Kapitel 2 wird der Stand der Forschung und der Technik zu den Bereichen Frontalkollisionsgegenmaßnahmen sowie zu deren Test- und Bewertungsverfahren dargestellt. Aus dem Fazit dieses Kapitels leitet sich in einer Defizitanalyse der weitere Forschungsbedarf ab. Daran schließt sich die Definition der Ziele der Arbeit (Kapitel 3) an.

2.1 Frontalkollisionsgegenmaßnahmen

Unter dem Begriff Frontalkollisionsgegenmaßnahme (FKGM) sind alle Aktionen von Einrichtungen in einem Fahrzeug subsumiert, die im Fall einer drohenden Kollision mit der Front des Fahrzeugs auf andere stehende und/oder bewegte Objekte zu einer Minderung der Unfallfolgen oder einer Vermeidung des Unfalls führen. Dies kann sowohl durch eine Warnung des Fahrers durch Warnelemente als auch durch intervenierende Systeme mit Brems- oder Lenkeingriff erfolgen. Ein Warnelement warnt den Fahrer hauptsächlich auf einem Sinneskanal. Während die Erregung etwa optisch, akustisch oder mechanisch ist, ist die Empfindung beim Menschen visuell, auditiv oder kinästhetisch (siehe dazu auch später Kapitel 6). Eine Warnmaßnahme oder Gegenmaßnahme kennzeichnet die Kumulation von Warnelementen, die zum gleichen Zeitpunkt ausgelöst werden. Die zeitliche Abstufung mehrerer Gegenmaßnahmen wird Strategie der Gegenmaßnahme genannt (beispielsweise Warnstrategie). Ein Antikollisionssystem umfasst neben Frontalkollisionsgegenmaßnahmen noch Umfeldsensorik und Verarbeitungseinheiten zur Interpretation der Situation und eine Vorrichtung zur zeitlichen Steuerung der Gegenmaßnahmen.

Die folgende Beschreibung zum Stand der Forschung und Technik der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen listet die zurzeit auf dem europäischen Markt verfügbaren Systeme auf.

Audi hat mit der Einführung des Q7 im Jahr 2005 den Braking Guard vorgestellt. Das Fahrzeug verfügt über einen Long-Range-Radar (LRR-)Sensor und warnt den Fahrer zuerst akustisch und optisch vor einer drohenden Kollision. Besteht die Kollisionsgefahr weiterhin, wird eine haptische Warnung durch einen Bremsruck erzeugt.²²

²² Wolkenstein, P.: ATZ – Q7, 2005, S. 967

Honda setzt seit 2006 für den europäischen Legend das Collision-Mitigation-Brake-System (CMBS) ein. Seit Anfang 2007 ist das gleiche System auch im CR-V erhältlich. Als Antikollisionssystem besitzt es eine dreistufige Strategie: Es warnt den Fahrer zunächst in der frühen Stufe akustisch und optisch. Bei weiterhin bestehender Kollisionsgefahr wird anschließend eine leichte Verzögerung von 2 m/s^2 inklusive mehrmaligem Straffen der Sicherheitsgurte mit einem reversiblen Gurtstraffer veranlasst. Ist der Aufprall nahezu unvermeidlich, leitet die letzte Stufe eine stärkere Verzögerung von 6 m/s^2 ein.²³

Beim Lexus A-PCS (Advanced Pre Crash Safety) wird der Fahrer bei einer drohenden Gefahr zunächst über akustische und optische Signale gewarnt. Besteht die Gefahr weiterhin, werden die Gurtstraffer aktiviert, die Auslöseschwelle für den Bremsassistenten angepasst, die Dämpferregelung des Fahrwerks auf hart geschaltet und eine Teilverzögerung des Fahrzeugs durchgeführt. Außerdem wird die Regelung der Überlagerungslenkung der Situation angepasst. Mit einer auf der Lenksäule angebrachten Kamera wird der Fahrer beobachtet. Erkennt die Verarbeitungseinheit in kritischen Situationen einen unaufmerksamen Fahrer, werden die Warnstufen zu einem früheren Zeitpunkt aktiviert.²⁴

Mercedes stellte 2007 das System Pre-Safe-Bremse vor. Bei diesem System wird der Fahrer ebenfalls zunächst in einer frühen Stufe optisch und akustisch gewarnt. Bei einer mittleren Gefahrenstufe wird das Fahrzeug mit einer Verzögerung von 4 m/s^2 automatisch abgebremst.²⁵

Beim VOLVO S80 bzw. V70 wird der Fahrer vor einer drohenden Kollision mit einem rot blinkenden, vom Armaturenbrett an die Windschutzscheibe projizierten Licht und einem akustischen Signal gewarnt.²⁶

Für den Kraftfahrzeugzubehörmarkt wird von der Firma Mobileye ein Kollisionswarnsystem zum Nachrüsten angeboten. Dieses detektiert Objekte und die Fahrstreifenmarkierung mittels einer monokularen Kamera, warnt den Fahrer optisch in einem separaten Display und akustisch durch zwei Zusatzlautsprecher.²⁷

²³ Kodaka, K.: Honda Rear-End Collision Velocity Reducting System, 2003

²⁴ Toyota-Presse: Lexus PCS im LS 460, 2006

²⁵ Steiner, M.: ATZ - Die neue S-Klasse, 2005, S. 88

²⁶ Volvo-Presse: Aktives Geschwindigkeits- und Abstandsregelsystem, 2007

²⁷ Gat, I.: SAE - mobileye, 2005

Weitere Fahrerwarnelemente sind aus der Forschung bekannt, bis jetzt jedoch nicht in die Serie eingeflossen. Dazu gehört das von Continental Automotive Systems vorgestellte aktive Gaspedal. Dabei wird zusätzlich zur passiven Gaspedalfederkennlinie durch einen E-Motor eine stationäre Gegenkraft oder eine Vibration erzeugt. Betätigt der Fahrer das Gaspedal, erfolgt die Information über einen zu geringen Abstand zum Vor-ausfahrenden durch eine erhöhte Gegenkraft und eine Kollisionswarnung durch Vibration.²⁸

Aus der Forschung sind weitere Frontalkollisionsgegenmaßnahmen bekannt, wozu exemplarisch zwei Systeme genannt werden. Kopischke beschreibt die Entwicklung einer Automatischen Notbremse (ANB). Ein Versuchsträger wird mit Sensorik zur Detektion von Hindernissen und einem automatischen Eingriff in die Bremsanlage ausgestattet. Kopischke untersucht unterschiedliche Ausprägungen von ANB und führt eine Nutzenabschätzung der ANB durch.²⁹ Im bereits erwähnten PRORETA-Kooperationsprojekt wurde eine automatische Notbremsung per elektro-hydraulischer Bremse (EHB) und ein automatisches Ausweichen mittels Eingriff in die Überlagerungslenkung in einem Versuchsträger umgesetzt und Probandenversuche durchgeführt.³⁰

Tabelle 2-1 zeigt eine Übersicht der verwendeten Sinneskanäle für Warnungen von ausgewählten verfügbaren FAS zur Längsführung.

Tabelle 2-1: Übersicht der verwendeten Sinneskanäle für Warnungen von ausgewählten verfügbaren FAS zur Längsführung in Europa (Ja: vorhanden, -: nicht vorhanden)

	System							
Hersteller	Audi	Ford	Honda	Lexus	Mercedes	Volvo	Mobility	Continental-Teves
Systembezeichnung	Braking Guard	FA & CMbB	CMBS	A-PCS	Pre-Safe-Bremse	Collision Warning	AWS 4000	Aktives Gaspedal
Sinneskanal								
visuell	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	-
auditiv	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	-
haptisch	-	-	Ja	-	-	-	-	Ja
kinästhetisch	Ja	Ja	Ja	-	Ja	-	-	-

²⁸ Conti-Press.: Aktives Gaspedal, 2008

²⁹ Kopischke, S.: ANB, 2000

³⁰ Bender, E.: PRORETA –Bremsassistent, 2007

2.2 Test- und Bewertungsverfahren für Frontalkollisionsge- genmaßnahmen

Generell werden die Methoden zur Entwicklung von FAS wie in Bild 2-1 eingeteilt.



Bild 2-1: Überblick über gebräuchliche Testmethoden nach König³¹

Nach König (siehe Bild 2-1) folgen nach der Spezifikation des FAS Tests mit repräsentativen Nutzern im Labor und im Simulator. Der wesentliche Vorteil der Simulation liegt in der schnellen Realisierung der Funktionen von FAS und der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Tests im statischen Fahrsimulator sind weniger aufwändig, Tests im dynamischen Simulator realistischer. Im weiteren Entwicklungsprozess finden Tests auf Testgeländen und später im realen Verkehr statt. Generell steigen Aufwand und Realitätsnähe der Tests vom statischen Fahrsimulator bis zum realen Fahrversuch im öffentlichen Verkehr an.

³¹ König, W.: Seminarunterlagen FAS, 2003

Untersuchungen zur Wirkung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen sind aus dem Simulator bekannt. Bei Graham³² werden im statischen Simulator Fahrerreaktionen auf akustische Warnungen in Gefahrensituationen ermittelt. Mazda³³ führt derartige Versuche in einen dynamischen Simulator durch. Mercedes³⁴ vollführt Untersuchungen zum Bremsassistenten Plus der S-Klasse im dynamischen Fahrsimulator. Schmitt³⁵, wie auch andere Forscher, hält Untersuchungen im Simulator zum Fahrerverhalten in Notsituationen für weniger aussagekräftig als Fahrversuche im kontrollierten Feld.

Demnach sind kontrollierte Feldexperimente auf Grund der natürlichen, multimodalen sensorischen Belastung der Versuchsperson den Simulatorexperimenten im Bereich der Reaktionszeit-Ermittlung überlegen. Mit dieser Begründung erfolgt im Folgenden eine Fokussierung auf Methoden des realen Fahrversuchs unter Einbeziehung von Probanden. Einen Überblick über weitere Verfahren zur Bewertung von FAS gibt Busch.³⁶

2.2.1 Methoden des realen Fahrversuchs

Im Folgenden werden bekannte Testmethoden für das Testen von Antikollisionssystemen während Realfahrten dargestellt. Die in diesem Kapitel beschriebenen Methoden vereint, dass fahrzeugbezogene Daten zur Wirkung und Funktion von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen unter Einbeziehung von Probanden ermittelt werden können. Dazu werden kritisch erscheinende Situationen dargestellt, ohne jedoch die Versuchsbeteiligten wirklich zu gefährden.

Kassaagi et al.³⁷ von Peugeot-Citroën (PSA) beschreiben ein Verfahren zum Testen von Bremsassistenten (BA) mit Probanden. Hinter einem Zugfahrzeug befindet sich ein leichter flacher Anhänger, ähnlich einem offenem Einachser mit Pritsche. Während der Folgefahrt wird der Anhänger – überraschend für den Probanden im Folgefahrzeug – abgekoppelt und abgebremst. Durch die Reaktion des Probanden im Folgefahrzeug wird eine Kollision vermieden. Die wichtigste Bewertungsgröße ist die Kraft, mit der der Proband das Bremspedal betätigt.

³² Graham, R.: Auditory Icons as emergency warnings, 1999, S. 1233

³³ Cheng, B.: Mazda Fahrsimulator, 2002

³⁴ Breuer, J.: Fahrversuche mit Probanden-Nutzwert und Risiko, 2003

³⁵ Schmitt, J.: Bremsverhalten in Gefahrensituationen, 2007

³⁶ Busch, S.: Bewertungsmethodik für FAS, 2004

³⁷ Kassaagi, M.: PSA-Bremsassistent, 2006

DaimlerChrysler³⁸ verwendet ein Funktions-Testverfahren für Radarsysteme, bei dem an einem vorausfahrenden Fahrzeug ein seitlicher Ausleger montiert ist. Das Folgefahrzeug mit einem Umfelderkennungssystem per Radar fährt auf dem Fahrstreifen hinter dem Ausleger. Bremsst das vorausfahrende Fahrzeug, schwenkt der Ausleger bei einem Aufprall nach oben, um das Fahrzeug passieren zu lassen.

Beim APIA-Demonstrator (Active Passive Integration Approach, mittlerweile ContiGuard genannt) von Continental-Teves³⁹ kommt das gleiche Verfahren zur Anwendung: An einem Rahmen ist ein Fahrzeugheck als Ausleger befestigt. Durch den Bediener ausgelöst klappt diese Vorrichtung per Federvorspannung bei einem drohenden Aufprall nach oben.

Von Bock⁴⁰ et al. wird ein Virtual Reality (VR) Testverfahren beschrieben. Auf dem Testgelände werden dem Fahrer die Kollisionspartner per Head-Mounted-Display (HMD) eingespielt. Das Testgelände ist zur genauen Positionsbestimmung des Fahrzeugs mit GPS-Sendern ausgestattet. Über ein System zur Bestimmung der Kopfposition im Fahrzeug und weiteren Verarbeitungseinheiten wird dem Fahrer ein künstlich erzeugtes Bild zur Überlagerung der realen Szenerie dargeboten. Das künstlich erzeugte Bild enthält die Kollisionspartner.

LeBlanc et al.⁴¹ beschreiben ein Verfahren zur Bestimmung eines Forward-Collision-Warning-Algorithmus, bei dem ein Fahrzeugmodell an einer langen Teleskopstange hinter einem Zugfahrzeug hergezogen wird. Die maximale Verzögerung bei einer Bremsung beträgt 0,39 s. Das Fahrzeugmodell an der Teleskopstange kann durch passives Zusammenschieben eines aufprallenden Fahrzeuges maximal 10 miles/h (16 km/h) Differenzgeschwindigkeit darstellen.

Jansson beschreibt ein Verfahren zum Darstellen von Kollisionsmanövern mit vorausfahrenden Fahrzeugen. Dazu wird das Heck des vorausfahrenden Fahrzeugs durch einen aufblasbaren Ballon dargestellt.⁴²

Bei der bereits erwähnten Untersuchung von Schmitt⁴³ (siehe Kapitel 2.2) wird eine Folgefahrtsituation mit zwei Fahrzeugen und einem plötzlichen Bremsmanöver erzeugt.

³⁸ HIGHTECHREPORT, DaimlerChrysler, 2005

³⁹ ATZ System Partners, APIA, 2003

⁴⁰ Bock, Th.: Simulations- und Testumgebung für FAS, 2005

⁴¹ LeBlanc, D.: Crash Alert Timing, 2001

⁴² Jansson, J.: Dissertation Linköping, 2005

⁴³ Schmitt, J.: Bremsverhalten in Gefahrensituationen, 2007

Der vorausfahrende herkömmliche PKW wird von einem hochtrainierten Fahrer bewegt.

Shutko⁴⁴ beschreibt ein Verfahren zum Ermitteln der Reaktionszeiten bei LKW-Fahrern. Bei der Vorbeifahrt an einer engen Stelle wird hinter einer Wand ein Gegenstand (Fass) auf die Straße vor dem LKW gerollt. Bestimmt wird die Anzahl der Kollisionen des LKW mit dem Hindernis.

Im Kooperationsprojekt PRORETA von drei Instituten der TU Darmstadt und Continental kamen ein seitlich gezogenes schaumstoffgefülltes Fahrzeugheck sowie ein aus einer feststehenden Tonne seitlich herauschnellender Luftschlauch zur Anwendung.⁴⁵ Dargestellt wurden plötzliche Einschermanöver vorausfahrender Fahrzeuge und Varianten eines autonomen Lenkeingriffs im Versuchsfahrzeug zum Vermeiden einer Kollision.

2.2.2 Methoden zur Bestimmung der Einschätzung durch Probanden

Im Gegensatz zu den im vorigen Kapitel beschriebenen Methoden sind die im Folgenden beschriebenen Inhalte darauf ausgelegt, probandenbezogen Daten zu ermitteln. Die Beurteilung der Mensch-Maschine-Schnittstelle stellt neben der Entwicklung der rein technischen Systemfunktion ein wichtiges Standbein im Entwicklungsprozess dar. In der Entwicklung befindliche FAS dürfen nicht nur auf reine Funktionalität, sondern müssen auch auf ihre Akzeptanz und Bedienbarkeit durch den späteren Nutzer hin entwickelt werden. Deshalb wird die Betrachtung der Mensch-Maschine-Schnittstelle bei der Entwicklung solcher Systeme eine immer größere Rolle spielen.⁴⁶

Die Betrachtung der Mensch-Maschine-Schnittstelle geschieht durch die Erprobung von Systemfunktionalitäten mit Probanden. Diese werden mit Methoden der Befragung zu ihren Eindrücken interviewt. Eine solche Art der Entwicklung unterscheidet sich von der seit langem praktizierten Erprobung durch Testfahrer (Experten) dahingehend, dass die Erprobung durch Probanden aussagekräftigere Ergebnisse bezüglich des späteren Nutzerverhaltens und der Akzeptanz liefert, als dies die Ergebnisse der Testfahrer können. Deren Aussage ist durch Insiderwissen und hohe fachliche Kompetenz geprägt, was für die Überprüfung der Funktionalitäten zwar von Nutzen ist, allerdings die Aufnahme der probandenbezogenen Eindrücke eines späteren Nutzers nicht ermöglicht.

⁴⁴ Shutko, J.: Virginia Tech Collision Avoidance, 1999

⁴⁵ Bender, E.: PRORETA – Bremsassistent, 2007

⁴⁶ Winner, H.: MuF, 2003

Genau diese probandenbezogenen Empfindungen allerdings geben Hinweise auf die Akzeptanz und Bedienerfreundlichkeit des zu entwickelnden Systems.⁴⁷ Auch Breuer hält die Kombination aus Expertenuntersuchungen und Probandenversuchen für effektiv.⁴⁸ Einen Einblick in weitere Methoden zum Ermitteln von Bewertungen durch Probanden enthält das Buch „Kraftfahrzeugführung“ von Jürgensohn und Timpe.⁴⁹

2.3 Nutzen von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen

Zweck von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen ist die Vermeidung von Unfällen bzw. die Reduktion der Unfallschwere. Der Nutzen von Antikollisionssystemen wurde bisher anhand von Berechnungen/Simulationen auf die Gesamtheit aller Unfälle übertragen.

Kopischke beschreibt den theoretischen Nutzen einer Automatischen Notbremsung (ANB). Dazu wird die Verletzungsschwere der Verunfallten in MAIS (Maximum Abbreviated Injury Scale) gemessen. Verglichen werden reale Unfälle mit Fahrzeugen ohne ANB mit denen der theoretisch durch ANB reduzierten Unfälle. Demnach kann eine ANB besonders in Situationen, in denen der Fahrer gar nicht oder nur leicht gebremst hat, die Verletzungsschwere reduzieren.⁵⁰

Breuer beschreibt den Nutzen von BAS-PLUS von Mercedes im Simulator. BAS-PLUS ist das Vorgängersystem von Pre-Safe-Bremse und arbeitet noch ohne einen intervenierenden Bremseingriff. Bei den Untersuchungen wurde eine Ablenkung des Fahrers durch einen Unfall auf der Gegenfahrbahn realisiert, wobei das vorausfahrende Fahrzeug stark verzögerte bzw. ein Fahrzeug einscherte. Als fahrzeugbezogene Bewertungsgrößen wurden die Anzahl der Kollisionen und die Kollisionsgeschwindigkeiten definiert. Das Ergebnis zeigt, dass mit dem BAS PLUS die Anzahl der Unfälle mit dem Probandenkollektiv von 110 Fahrern von 44 % mit herkömmlichem Bremsassistenten auf 11 % mit BAS PLUS reduziert wurde.

In weiteren Versuchen mit 70 Probanden mit Pre-Safe-Bremse wird die Aufprallgeschwindigkeit von 45 km/h auf 35 km/h reduziert.⁵¹

⁴⁷ Bubb, H.: Fahrversuche mit Probanden, 2003

⁴⁸ Breuer, J.: Fahrversuche mit Probanden-Nutzwert und Risiko, 2003, S.78

⁴⁹ Jürgensohn, Th.: Kraftfahrzeugführung, 2001, S. 31

⁵⁰ Kopischke, S.: ANB, 2000

⁵¹ Breuer, J.: Fahrversuche mit Probanden, 2007, S.125

Khanafer⁵² kalkuliert den Nutzen verschiedener FAS mit einem empirischen Modell auf Grundlage von Unfalldaten von Destatis. Das „Accident Reduction Potential (ARP)“ einer Kombination aus FAS für den Längsverkehr kann demnach 12 bis 17 % bezogen auf alle Unfälle betragen.

Der Nutzen von Notbremssystemen wird auch von der Versicherungswirtschaft in eigenen Studien abgeschätzt. So beziffert die Allianzversicherung den Nutzen zur Unfallvermeidbarkeit von Notbremssystemen, die keine Umfeldinformation haben und nur eine Bremsung bei Fahrereingriff durchführen, auf unter 5 % aller beeinflussbaren PKW-Unfälle. Hingegen wird der Nutzen zur Unfallvermeidung mit einem Umfelderkennungssystem und einem Teilbremseingriff ohne Fahrereingriff bereits auf 5-10 % prognostiziert, der Vollbremseingriff auch für stehende Ziele sogar auf 15-20 %.⁵³

Eine In Depth Untersuchung im Auftrag der BASt ergab, dass ca. 70 % aller schweren Unfälle durch Fahrerassistenzsysteme potentiell und ca. 30 % durch aktiv eingreifende FAS vermeidbar sind. Mit einem System zur Kollisionsvermeidung mit situationsabhängiger Regelung von Abstand und Geschwindigkeit, einer Erkennung von stehenden Fahrzeugen und einer Bremsunterstützung können 17,5 % aller schweren Unfälle verhindert werden.⁵⁴

2.4 Fazit zum Stand der Forschung

Der Stand der Technik im Bereich Frontalkollisionsgegenmaßnahmen zeigt die Vielfalt der vorhandenen Varianten. Zur Kollisionswarnung im Längsverkehr hat sich bis jetzt keine einheitliche Maßnahme durchsetzen können. Bevorzugt Fahrzeuge der oberen Fahrzeugklassen (Oberklasse, Obere Mittelklasse, Mittelklasse)⁵⁵ können mit warnenden Frontalkollisionsgegenmaßnahmen ausgestattet werden.

Einige Fahrzeuge führen bereits einen Eingriff in die Längsdynamik durch. Generell vollzieht sich die Entwicklung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen von warnenden Antikollisionssystemen zu automatisch intervenierenden Systemen. Bisher sind die Eingriffe in das Fahrzeug eher spät und mit geringen Verzögerungen. Geforscht wird aber an Systemen zur vollständigen Kollisionsvermeidung auch ohne Aktionen des

⁵² Khanafer, A.: Benefits of ADAS, 2008

⁵³ Gutberlet, K.-W.: Allianz-Prognose, 2008

⁵⁴ Vollrath, M.: Anforderungen an FAS, 2006

⁵⁵ Zur Fahrzeugklasseneinteilung siehe www.kba.de

Fahrers durch automatische Vollverzögerungen und/oder Lenken kurz vor der Kollision. Der Stand der Forschung zeigt im Bereich der Testmethoden des realen Fahrversuchs die Schwierigkeiten beim Darstellen von kritisch erscheinenden Fahrsituationen. Bei der Verwendung von herkömmlichen, durch Testfahrer gefahrenen Fahrzeugen ohne eine aktive Kollisionsvermeidung, kann die Kritikalität der Situation bestimmte Werte nicht überschreiten, da ansonsten eine Kollision der Fahrzeuge und damit Schäden nicht ausgeschlossen werden können (siehe Kapitel 2.2.1 bei Schmitt, LeBlanc, Kassaagi). Bei anderen Testmethoden ist der Ausweichraum des Probandenfahrzeugs beschränkt (Fahrzeuge mit Ausleger von Daimler und Continental). Andere Objekte können kritisch erscheinende Situationen darstellen, vermitteln dem Probanden jedoch nicht den Eindruck eines Realfahrzeugs (Volvo, PRORETA). Mit dem Fokus der Bewertung auf Sensorleistung oder der Situationsinterpretation ohne den Einsatz von Probanden können diese Einschränkungen hingenommen werden. Aufgrund des Fehlens geeigneter Methoden findet bei der Entwicklung von FKGM nach der Systembeurteilung im Fahr-simulator direkt der Feldtest im realen Straßenverkehr statt (Daimler). Ermittelt werden im realen Straßenverkehr vorzugsweise die Wirkung und Anzahl von Fehlauflösungen. Aufgrund des Mangels an kritischen Situationen wird nicht die Wirkung der Systeme in Unfallsituationen bestimmt. Zu beobachten ist bei FKGM die Verbreitung von autonomen Teilbremseingriffen in der Serie (siehe Kapitel 2.1 bei Honda, Mercedes).

Für die Beurteilung von automatisch intervenierenden Systemen liegen allerdings noch keine auf die Realität übertragbaren Erkenntnisse mit unvorbereiteten Probanden in realen Schrecksituationen vor. Neben den technischen Gesichtspunkten, wie der Sensorleistung und der Situationsinterpretation, ist die Bewertung des Fahrerverhaltens in und besonders nach einem berechtigten automatischen Eingriff der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen zu klären. Die Frage nach dem Fahrerverhalten bei automatischen Eingriffen ist beispielsweise ein aktueller Untersuchungsschwerpunkt des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Projekts „aktiv“.⁵⁶

Der Nutzen von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen wurde bisher theoretisch abgeschätzt. Auf Grundlage der teilweise wenig präzisen Angaben in den Unfalldatenbanken wird mit einer Simulation der Nutzen von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen beurteilt (siehe Kapitel 2.3 bei Kopischke, Khanafer, Allianz, BAST).

Versuche mit einer Vielzahl an Probanden im Simulator ermöglichen den Vergleich zweier Systemausprägungen und die Abschätzung des Nutzens (Breuer).

⁵⁶ weitere Informationen unter www.aktiv-online.org

3 Zielsetzung der Arbeit

Aus dem Stand der Forschung und der Technik zu FKGM und deren Bewertungsverfahren leitet sich der Themenfokus der vorliegenden Arbeit ab.

3.1 Ermittlung des Forschungsbedarfs

Für in kritischen Situationen warnende oder intervenierende FAS ist kein universell einsetzbares Testverfahren für Realfahrten bekannt, bei dem Probanden ohne Einschränkungen durch deren Unvoreingenommenheit - hervorgerufen durch das Versuchswerkzeug - eingesetzt werden können. Mit der Fragestellung aus Kapitel 1.2, wie FKGM auf ihre Leistungsfähigkeit überprüft werden können, wird im Rahmen dieser Arbeit ein neuartiges Test- und Bewertungsverfahren für Realfahrten im kontrollierten Feld mit Probanden dargestellt. Im Gegensatz zu Systemen der passiven Sicherheit existieren keine etablierten Verfahren zur Bewertung der aktiven Sicherheit.⁵⁷

3.2 Zieldefinition

Aus der Ermittlung des Forschungsbedarfs leitet sich die Zieldefinition für die vorliegende Arbeit ab: Es gilt, ein für die Bewertung von Wirksamkeit und Akzeptanz von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen geeignetes Test- und Bewertungsverfahren zu entwickeln, das valide zumindest für das Haupteinsatzszenario ist.

Von besonderem Interesse ist gemäß der Defizitanalyse im Kapitel 2.4 die Wirkung beim Fahrzeugführer und den Nutzen der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen zu beurteilen. Die Optimierungsrichtung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen ist die Reduktion der Anzahl von Verletzten und Getöteten im Straßenverkehr. Daraus ergibt sich die übergeordnete Hauptfragestellung:

Können Frontalkollisionsgegenmaßnahmen bezüglich ihrer Eignung zur Unfallvermeidung unter Verwendung von unvorbereiteten Probanden in realen Unfallsituationen in eine Rangfolge gebracht werden?

⁵⁷ Siehe auch Busch, S.: Bewertungsmethodik für FAS, 2004, S. 25

Ziel ist, eine Bewertung der unterschiedlichen Frontalkollisionsgegenmaßnahmen bzgl. verschiedener Kriterien in Realfahrten zu erhalten, um eine Aussage über die Rangfolge bzw. die Güte der Methoden zur Unfallvermeidung im Längsverkehr zu erhalten.

3.3 Postulat

Der Stand der Forschung und der Technik hat gezeigt, dass eine Methode zur Beantwortung der Fragestellung aus Kapitel 3.2 nicht vorhanden ist. Deshalb wird postuliert:

Es ist möglich, Frontalkollisionsgegenmaßnahmen im realen Fahrversuch mit Probanden und mit der Erzeugung kritisch erscheinender Situationen einzuordnen und bezüglich ihrer Wirksamkeit zu bewerten.

4 Test- und Bewertungsverfahren mit EVITA

Für die Durchführung des Entwicklungsprozesses von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen ist das eigene Bewertungsverfahren mit einem Top-Down-Ansatz abgeleitet worden. Damit werden die zwei Hauptunfallszenarien gemäß Tabelle 1-1 abgebildet: Aus der stationären Kolonnenfahrt verzögert das vorausfahrende Fahrzeug überraschend, das Folgefahrzeug droht auf das fahrende oder zum Stehen gekommene Fahrzeug aufzufahren.

4.1 Ziele und Anforderungen

Das Hauptentwicklungsziel bestand darin, ein Werkzeug für die Bewertung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen im Längsverkehr zu erstellen. Die Anforderungsliste sah vor, die Bewegungsgrößen eines vorausfahrenden Fahrzeugs aus der stationären Kolonnenfahrt mit einem unerwarteten Bremsmanöver darstellen zu können. Die Probanden dürfen bei dem zu entwickelnden Testverfahren keinem höheren Risiko ausgesetzt sein als bei anderen üblichen Fahrversuchsverfahren. Weiteres Ziel bei der Entwicklung von EVITA war, eine maximale Unvoreingenommenheit der Probanden durch das Werkzeug zu erreichen. Deshalb wurde Wert auf eine größtmögliche Übereinstimmung der Heckansicht mit einem herkömmlichen Personenkraftwagen gelegt. Die Forderung nach der größtmöglichen Übereinstimmung der Heckansicht mit bekannten Fahrzeugen öffnet neben der Durchführung von Probandenversuchen auch die Nutzung für die Entwicklung und Bewertung von Sensorkonzepten für Antikollisionssysteme. Zum Bewerten der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen ist neben dem vorausfahrenden Fahrzeug ein mit einem Messsystem ausgestattetes Versuchsfahrzeug notwendig, das zum Ermitteln der Fahrerreaktionen geeignet sein muss.

4.2 EVITA

Die Lösung besteht aus der Kombination aus einem Zugfahrzeug, einem Anhänger und einem auffahrenden Fahrzeug. Während einer stationären Folgefahrt (der Abstand zwischen den Fahrzeugen ist konstant) bremst der Anhänger (genannt Dummy Target) für den im Versuchsfahrzeug sitzenden Probanden überraschend ab. Unabhängig davon, ob

der Proband auf das Manöver rechtzeitig reagiert oder nicht, wird der Anhänger aktiv aus dem Kollisionsbereich gezogen. Bild 4-1 zeigt das Gespann.



Bild 4-1: EVITA bestehend aus Zugfahrzeug und Anhänger (Dummy Target)

4.2.1 Aufbau

Im Heck des Zugfahrzeugs befindet sich eine Seilwinde mit einer reibkraftschlüssigen Windenbremse und einem Elektromotor. Der Anhänger ist mit dem Zugfahrzeug nur über das Seil der Winde verbunden. Das andere Ende des Seils ist an der Achsschenkel lenkung der Vorderachse des Anhängers befestigt. Die Scheibenbremsen des Anhängers werden hydraulisch via Handbremshebel von einem stromgeregeltem Elektromotor betätigt. Im hinteren Bereich des Anhängers befindet sich das originale Heck der Mercedes A-Klasse. In diesem ist ein aus der Anwendung im Adaptive Cruise Control (ACC) bekannter Radarsensor befestigt. Im Zugfahrzeug und im Anhänger befinden sich Rechner, die durch Funkmodems miteinander verbunden sind. Bild 4-2 gibt eine Übersicht über die im Zugfahrzeug eingesetzten Komponenten und deren Zusammenhang.

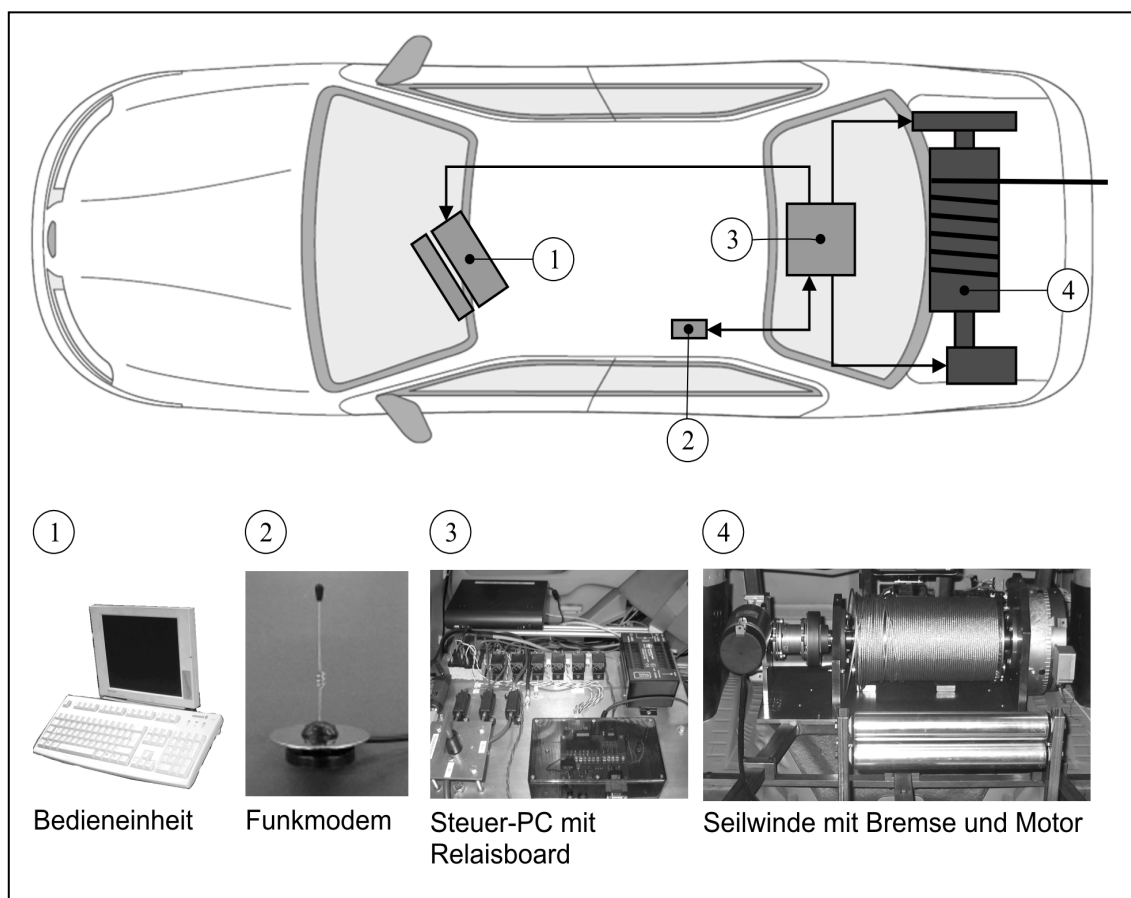


Bild 4-2: Aufbau und Komponenten Zugfahrzeug

Die Abbremsung des Dummy Target wird vom Bediener im Zugfahrzeug an der Bedieneinheit gesteuert. Sowohl im Zugfahrzeug als auch im Anhänger kommen lüfterlose, mit jeweils einer Compact-flash-Karte ausgestattete Rechner zum Einsatz. Im Zugfahrzeug werden über die COM-Ports des Rechners das Funkmodem und die Relaiskarte gesteuert. Auf der Relaiskarte werden die Signale zum Öffnen und Schließen der Windenbremse und des Gleichstrommotors zum Aufwickeln des Seils geschaltet. Die Windenbremse ist eine Positionierbremse aus der Robotik, während der E-Motor aus dem Anwendungsbereich von Krankenfahrrädern bekannt ist.

Als Grundgerüst des Anhängers von EVITA dient eine Gitterrohrrahmenkonstruktion. An diesem Rahmen befinden sich vier Einzelradaufhängungen eines Quads. Die Spurstangen der Vorderachse sind über einen Lenkhebel mit dem Seil der Winde verbunden. Ein großer Nachlauf an der Vorderachse sorgt für einen ruhigen Geradeauslauf. In einem wetterfesten Gehäuse befinden sich der lüfterlose Rechner, das Funkmodem, die Energieversorgung und die Bremsensteuerung. Auf die serienmäßigen Handbremshebel der Quadbremse wirkt per Seilzug ein momentengeregelter Gleichstrommotor. Es existiert eine statische Bremskraftaufteilung zwischen Vorderachse und Hinterachse. Als Rückansicht von EVITA sind die Heckklappe und die Heckschürze sowie die Rück-

leuchten einer Mercedes A-Klasse montiert. Die Bremsleuchten der Heckansicht sind funktionstüchtig. Die Gesamtmasse des Dummy Target beträgt 200 kg.

Bild 4-3 zeigt eine Übersicht über die Komponenten des Dummy Target.

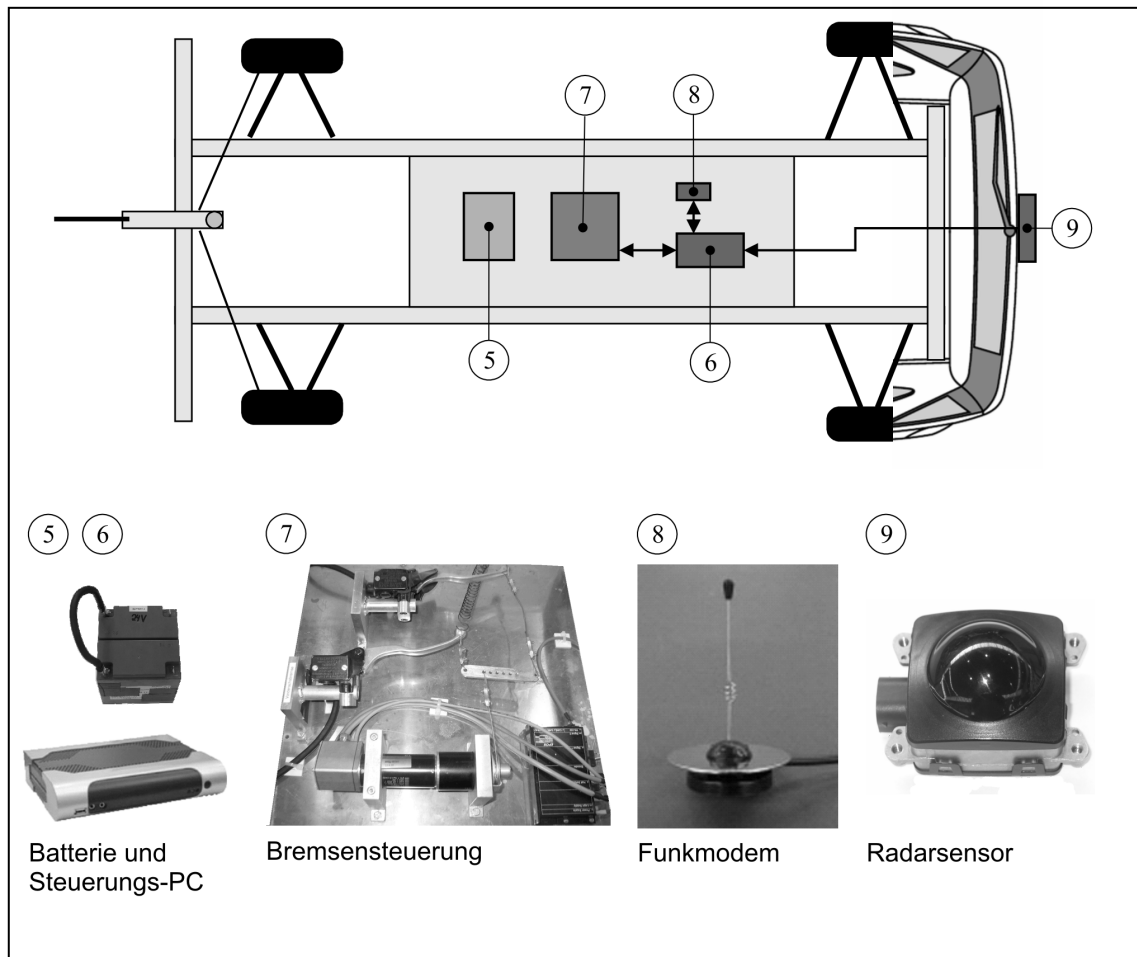


Bild 4-3: Aufbau und Komponenten Dummy Target

4.2.2 Versuchsablauf

Im Ausgangszustand ist der Anhänger hinter dem Zugfahrzeug kurzgekoppelt. Befindet sich ein Fahrzeug hinter dem Anhänger, kann das Gesamtsystem für eine Versuchsdurchführung aktiviert werden. Ein Befehl des Bedieners im Zugfahrzeug öffnet die Bremse der Seilwinde und schließt die Scheibenbremsen des Anhängers. Das Zugfahrzeug fährt während dieses Vorgangs mit unveränderter Geschwindigkeit weiter. Durch das Bremsen des Dummy Target wickelt sich das Seil der Winde ab. Während der Anhänger verzögert, berechnet die Verarbeitungseinheit des Abstandssensors permanent die Time-To-Collision (TTC). Die TTC ist ein aus Abstand und Relativgeschwindigkeit gebildetes Kriterium:

$$TTC = \frac{d}{v_{rel}} [s] \quad (4.1)$$

Dabei gibt d den Abstand in [m] zum vorausfahrenden Objekt und v_{rel} die Relativgeschwindigkeit in [m/s] an. Unterschreitet die TTC einen festgelegten Wert, schließt die Seilwindenbremse im Zugfahrzeug. Der Anhänger beschleunigt dann auf das mit konstanter Ausgangsgeschwindigkeit fahrende Zugfahrzeug. Die Beschleunigung des Anhängers dauert bei maximaler Differenzgeschwindigkeit ca. 1 s. Die Positionierbremse ermöglicht ein Einbremsen des 50 Meter langen Seils mit der definierten Kraft von 5000 N. Das Seil hat einen Durchmesser von 5 mm. Windendrehzahl und Seillänge werden durch einen Sensor an der Winde überprüft.

Die Windenbremse wird bei folgenden Anlässen geschlossen:

- Kein relevantes Zielfahrzeug von der Verarbeitungseinheit des Sensors erkannt
- Überschreitung der Grenzdrehzahl von 1500 min^{-1} (die Differenzgeschwindigkeit beträgt in diesem Fall 15 m/s)
- Restseillänge von 15 m auf der Winde verfügbar
- Meldung eines kritischen Betriebszustands (Ausfall einer Verarbeitungseinheit oder Batteriespannung zu gering)

Nach der Beendigung des Versuchs wird das gesamte Gespann bis zum Stillstand abgebremst. Mithilfe des Elektromotors an der Seilwinde wird der Anhänger wieder eingeholt, bis der kurzgekoppelte Zustand erreicht ist.

4.2.3 Leistungsdaten

Die Leistungsdaten von EVITA zeigt Tabelle 4-1.

Tabelle 4-1: Leistungsdaten EVITA

Maximale Differenzgeschwindigkeit zwischen auffahrendem Fahrzeug und Dummy Target	50 km/h
Maximale Bremsverzögerung des Dummy Target	9 m/s ²
Kleinste TTC vor einem Versuchsende	0,8 s
Übliche Testgeschwindigkeiten (Ausgangsgeschwindigkeit)	50 bis 80 km/h

4.2.4 Ablenkung des Probanden

Wie aus den Tabellen im Kapitel 1.2 hervorgeht, stellt die Unaufmerksamkeit eines Fahrers in einer Folgefahrtsituation mit konstanter Geschwindigkeit die Hauptunfallursache für Frontalkollisionen dar. In mehr als 80 % dieser Situationen führen die Fahrer keine unfallvermeidende Aktion durch. Um eine den realen Unfällen vergleichbare Situation auf dem Testgelände zu erzeugen, wird der Fahrer unmittelbar vor einer Abbremsung des vorausfahrenden Dummy Target abgelenkt. In Vorversuchen wurde aus einer Anzahl von fünf ermittelten oder bekannten Nebenaufgaben die Aufgabe mit der am konstantesten und am längsten andauernden Blickabwendung gewählt. Zusätzlich zu diesen per Kamera ermittelten fahrzeugbezogenen Daten wurden die Probanden per Fragebogen nach der Nebenaufgabe mit dem größten Ablenkungspotential befragt. Die erfolgreichste Nebenaufgabe ist das Vorlesen von Navigationsanweisungen vom Ausdruck eines Routenplaners. Um die kritisch wirkende Situationen auf einem Testgelände im kontrollierten Feld darzustellen, wurde der Fahrer während der konstanten Folgefahrt aufgefordert, die Anweisungen vorzulesen. Während der Ablenkung des Fahrers wird das Bremsmanöver des Dummy Target durchgeführt. Der Ausdruck des Routenplaners wird vom Versuchsleiter neben der Mittelkonsole auf der Seite des Beifahrers gehalten, sodass wegen des Ablenkungswinkels zur fovealen Stimulierung⁵⁸ eine Kopfdrehung des Fahrers erforderlich ist. Bild 4-4 zeigt den Aufbau der Nebenaufgabe aus Sicht des Fahrers und einen Auszug aus dem Routenplaner.



Bild 4-4: Aufbau Nebenaufgabe und Routenplaner mit Textauszug

⁵⁸ Die Fovea ist das Gebiet höchster Sehschärfe auf der Netzhaut

Beim Überschreiten der Aktivierungsschwelle wird der Proband von den Frontalkollisionsgegenmaßnahmen gewarnt. Sobald dieser den Blick auf die Straße richtet, kann das bremsende vorausfahrende Fahrzeug erkannt werden. Es ist davon auszugehen, dass stark bremsende Fahrzeuge Erkennungsmustern bei geübten Fahrern entsprechen.⁵⁹

Die Technik der gezielten Ablenkung des Probanden durch die Vergabe einer Nebenaufgabe ist aus unterschiedlichen Bereichen bekannt. Bei der Evaluierung des BAS-PLUS von Mercedes-Benz im Simulator wurde eine Ablenkung des Fahrers durch einen Unfall auf der Gegenfahrbahn realisiert, wobei auch in diesem Fall das vorausfahrende Fahrzeug stark verzögerte.⁶⁰ Als fahrzeugbezogene Bewertungsgrößen wurden die Anzahl der Kollisionen und die Kollisionsgeschwindigkeiten definiert (siehe Kapitel 2.3). Bei den bereits erwähnten Versuchen im Simulator von Mazda werden die Probanden durch eine während der Fahrt durchzuführende Rechenkalkulation auf einem Klemmbrett neben dem Fahrer vom Verkehrsgeschehen abgelenkt.⁶¹ Färber und Maurer lenken Probanden durch die Bedienung des Radios oder des Navigationssystems direkt vor der Auslösung einer ANB ab.⁶² In Versuchen zur Evaluierung eines Kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten fordert Klanner Probanden auf, die Aufschrift einer Vignette auf der linken Seitenscheibe vorzulesen. Laut dieser Untersuchung kann von einer mehrere Sekunden dauernden Ablenkung des Fahrers ausgegangen werden.⁶³

Krüger liefert ein Erklärungsmodell, warum Probanden sich ablenken lassen: Demzufolge erscheint dem Probanden der Verlauf der Fahraufgabe als wenig anspruchsvoll, weswegen er mit der Nebenaufgabe beginnt. Während der Ausführung der Nebenaufgabe wird die Situation über kurze Kontrollblicke überwacht. Erst wenn Abweichungen zur antizipierten Situation (siehe im Kapitel 1.2 preview und prediction) auftreten, wird die Nebenaufgabe unterbrochen.⁶⁴

Von Färber et al. wird gezeigt, dass die Bremsung eines vorausfahrenden Fahrzeugs als bedrohlicher eingeschätzt wird als beispielsweise ein fallender Schaumstoffwürfel, womit der Nutzen des Werkzeug EVITA erkennbar wird.⁶⁵

⁵⁹ Färber, B.: Bremsverhalten in Gefahrensituationen, 2007, S. 78

⁶⁰ Breuer, J.: Fahrversuche mit Probanden, 2007, S.125

⁶¹ Cheng, B.: Mazda Fahrsimulator, 2002

⁶² Färber, B.: Fahrerverhalten bei ANB, 2005

⁶³ Klanner, F.: Querverkehrsassistent, 2008

⁶⁴ Krüger, H.-P.: Umgang mit Nebenaufgaben, 2007, S. 93

⁶⁵ Färber, B.: Bremsverhalten in Gefahrensituationen, 2007, S. 83

4.2.5 Gefährdungen von Versuchsteilnehmern

Zur Bestimmung potentieller Systemfehlfunktionen wurde eine System-FMEA durchgeführt und daraus Maßnahmen für den sicheren Betrieb abgeleitet. Während jeder Versuchsdurchführung laufen automatisierte Sicherheitsprüfroutinen ab. Wird ein Fehler erkannt, wird das System in einen sicheren und stabilen Zustand überführt (siehe dazu auch die Beschreibung zum Schließen der Windenbremse im Kapitel 4.2.2). Das Sicherheitsniveau wird durch das automatisierte Auslösen einer Notbremsung im folgenden Versuchsfahrzeug beim Erreichen einer TTC von 0,7 s zusätzlich erhöht. Die für die Durchführung der Versuche eingestellte, minimal erreichbare TTC durch eine kollisionsvermeidende Aktion von EVITA liegt bei 0,8 s (siehe Tabelle 4-1). Wird eine TTC kleiner als 0,8 s erreicht, so muss von einer Fehlfunktion von EVITA ausgegangen werden. Sollte eine Kollision trotz aller Vorkehrungen unvermeidbar sein, wird aufgrund der geringen Masse des Dummy Target kein Schaden für Versuchspersonen erwartet.

4.3 Versuchsfahrzeug

Als Versuchsfahrzeug wird ein Honda Legend, Baujahr 2006 in europäischer Spezifikation mit einem serienmäßigen ACC-System inklusive CMBS (Beschreibung in Kapitel 2.1) verwendet.

4.3.1 Messkonzept im Versuchsfahrzeug

Das auffahrende Versuchsfahrzeug ist mit einem Antikollisionssystem ausgestattet. Der serienmäßige Radarsensor klassifiziert das vorausfahrende Dummy Target als relevantes Zielobjekt. Per Gateway und CAN-Bus werden Objektgrößen, wie beispielsweise Abstand d und Relativgeschwindigkeit Δv an einen Real-Time-Rechner übermittelt. Dieser bestimmt anhand eines Algorithmus das Kriterium TTC (siehe Formel 4.1). Über einen zweiten Rechner mit Bedienschnittstelle werden von einem Versuchsbegleiter Einstellungen vorgenommen. Dadurch ist unter anderem die Steuerung und Einstellung der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen möglich.

Das Fahrzeug verfügt über ein Messtechniksystem zur kombinierten Erfassung von CAN- und Kameradaten. Drei Kameras beobachten den Fahrer. Die erste Kamera ist auf das Vorfeld des Fahrzeugs gerichtet. Sie ermöglicht, im Zusammenhang mit den Radar-Daten, eine manuelle Interpretation der Situation. Ein verfrühter Versuchsabbruch, beispielsweise durch eine Fehlfunktion von EVITA oder ein zu großer seitlicher Versatz, sind bei der Auswertung in Ergänzung zum Versuchsprotokoll ersichtlich. Die

zweite Kamera ist vom Kombi-Instrument aus auf das Gesicht des Fahrers gerichtet. Somit ist unter anderem eine Zuordnung der Blickrichtung des Fahrers möglich. Die dritte Kamera ist auf die Pedalerie des Fahrzeugs fokussiert. Dies ermöglicht die Analyse der Fußbewegungen des Fahrers und die Bestimmung von Aktionszeiten, wie beispielsweise die Umsetzzeit vom Gaspedal auf das Bremspedal. Die Bildwiederholungsrate für jede der drei Kameras liegt bei 20 ms. Dasselbe Messsystem zeichnet die CAN-Daten auf, sodass eine zeitliche Zuordnung von Bildern und Signalen gegeben ist. Bild 4-5 zeigt eine Systemübersicht des Versuchsfahrzeugs mit den Komponenten.

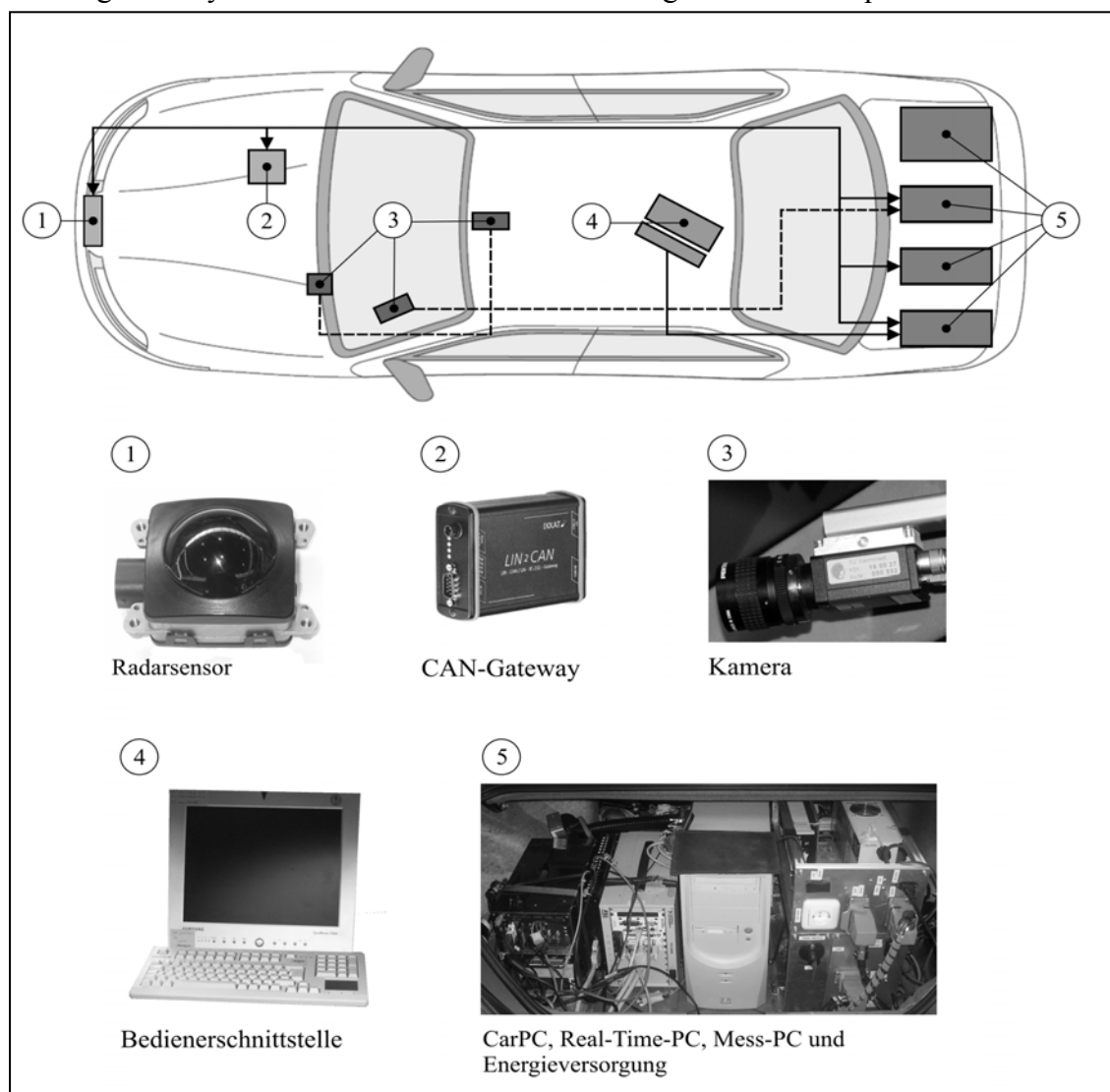


Bild 4-5: Aufbau und Komponenten Versuchsfahrzeug

Das System besteht aus einem Messrechner im Kofferraum, der zugehörigen Software zur Auswertung von der Firma Dewetron sowie den drei Kameras im Fahrzeuginnenraum. Bei den Kameras handelt es sich um VGA-C-Mount Kameras mit jeweils einem sehr empfindlichen CCD-Sensor. Neben den Videodaten werden CAN-Daten aufgezeichnet. Diese Kombination aus CAN-Größen und Videodaten ist die Basis für eine

fahrzeugbezogene Auswertung anhand messbarer Größen. Insgesamt stehen folgende Größen zur Verfügung (Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2: erhobene Daten

Größe	Sensor/Quelle	Abk.	Wert
Zeit absolut und seit Versuchsauslösung	Quarzuhr Messrechner	T	s
Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug	Radarsensor	d	m
Relativgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug	Radarsensor	Δv	m/s
Fahrzeuggeschwindigkeit	Raddrehzahlsensoren (4x)	v_{EGO}	m/s
Fahrzeuglängsbeschleunigung	Längsbeschleunigungssensor	a_{EGO}	m/s ²
ESP-Status (ABS-Eingriff, ESP-Eingriff, Bremsassistent)	CAN-Daten vom ESP-Steuergerät	ESP, ABS, BA	-
Absolutgeschwindigkeit des getrackten Targets	Berechnung im Messrechner	v_{target}	m/s
Time-To-Collision PXI	Real-Time-Rechner PXI	TTC	s
Time-To-Collision Messrechner	Berechnung im Messrechner	TTC	s
Lenkradwinkel	Lenkradwinkelsensor	δ	°
Hydraulischer Bremsdruck im Hauptbremszylinder	Drucksensor	p_{HBZ}	bar
Hydraulischer Bremsdruck an den Radbremszylindern der Vorderachse	Drucksensor	p_{caliper}	bar
Gaspedalwinkel	Potentiometer	α	°
Status Bremspedal (gedrückt, nicht gedrückt)	Endlagenschalter	S_{tBrake}	-
Drehzahl Verbrennungsmotor	Inkrementengeber	n	min ⁻¹
Aktivierungszeitpunkt aller Frontalkollisionsmaßnahmen	PC-Schnittstelle zum Bediener	TTC_XX	s
Parametereinstellungen aller Frontalkollisionsmaßnahmen	PC-Schnittstelle zum Bediener	-	-
Außentemperatur	Temperaturmesser	$Temp$	°C
Blickrichtung Proband	Gesichtskamera	-	fps
Fußbewegung Proband	Fußraumkamera	-	fps
Umfeldsituation	Umfeldkamera	-	fps

Das nachfolgende Bild 4-6 zeigt die Benutzeroberfläche des Messsystems, wie sie in den Versuchsfahrten und zur Auswertung der Messdaten verwendet wurde.



Bild 4-6: Benutzeroberfläche zur Aufzeichnung und Auswertung der Versuchsfahrten

Zu sehen sind die Bilder der drei Kameras sowie die Darstellung der relevanten CAN-Daten aus Tabelle 4-2.

4.3.2 Frontalkollisionsgegenmaßnahmen im Versuchsfahrzeug

Für die Bewertung wurde das Versuchsfahrzeug mit Frontalkollisionsgegenmaßnahmen ausgestattet. In Kapitel 6.3 wird detailliert auf die Ausprägungen der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen eingegangen. Den untersuchten FKGM werden im Weiteren die englischen Abkürzungen in der Klammer zugeordnet:

- Soundausgabe (*Sound*)
- Sitzvibration (*Seat Vibration*) & Optische Warnung (*Symbol*)
- Bremsruck (*Jerk*)
- Autonomer Teilbremseingriff (*Partial*)
- Autonomer Vollbremseingriff (*Full*).

4.4 Bewertungskriterien

Mit EVITA liegt das Werkzeug zum Erzeugen von kritischen Unfallsituationen vor. Im Folgenden werden die Bewertungsgrößen zur Beurteilung der Güte von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen beschrieben.

4.4.1 Wirksamkeit von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen

Als fahrzeugbezogene Beurteilungsgröße für die Wirksamkeit von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen wird die Verringerung der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs vor dem Aufprall herangezogen. Dieses Kriterium stimmt mit dem generellen Ziel von Antikollisionssystemen überein, entweder die Aufprallgeschwindigkeit zu reduzieren oder die Vermeidung des Aufpralls zu erreichen. Je höher die Verringerung der Geschwindigkeit, desto wirksamer ist das Antikollisionssystem. Neben der fahrzeugbezogenen Wirksamkeit wird die von den Probanden beurteilte probandenbezogene Wirksamkeit definiert. Definiert wird diese per Fragebogen ermittelte Größe als Vergleich zwischen verschiedenen Ausprägungen von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen durch das Bilden einer Rangfolge.

4.4.2 Beurteilungszeitraum

Vorbemerkung: In den durchgeführten Versuchen ist eine Streuung der Ausgangsgeschwindigkeit des vom Probanden gefahrenen Versuchsfahrzeugs nicht zu vermeiden. Viele Probanden neigen zum Einstellen eines persönlichen Abstands, der jedoch einer zum Zweck der Übertragbarkeit gewünschte Standardisierung des Testverfahrens entgegensteht. Die Vergabe der Ablenkungsaufgabe an den Probanden (siehe Kapitel 4.2.4) kann weitere Geschwindigkeits- und Abstandsveränderungen zur Folge haben. Aus diesen Gründen passt der Bediener des EVITA-Zugfahrzeugs Abstand und Geschwindigkeit an die Fahrweise des hinter ihm fahrenden Probanden an. Das Kontrollinstrument für den Bediener im Zugfahrzeug ist die Darstellung der Radarsensordaten auf der Bedienerschnittstelle. Die genannten Effekte führen zu einer Varianz der Ausgangsgeschwindigkeit im Moment des Bremsbeginns von EVITA. In den Vorversuchen ergab sich eine Differenz von maximaler zu minimaler Geschwindigkeit von maximal 8 km/h. Wegen dieser geringen Unterschiede in den Ausgangsgeschwindigkeiten wird angenommen, dass sich für die Probanden kein unterschiedliches Fahrgefühl einstellt, das zu einer Verzerrung des Gesamtbildes führen könnte.

Für die Beurteilung der Wirksamkeit wird ein Beurteilungszeitraum festgesetzt. Zur Bestimmung der Wirksamkeit wird die Geschwindigkeit des Probandenfahrzeugs zu Beginn und am Ende des Beurteilungszeitraums bestimmt (Geschwindigkeitsdifferenz

Δv). Bild 4-7 zeigt einen exemplarischen Versuchsablauf einer warnenden Frontalkollisionsgegenmaßnahme mit der Ablenkung des Probanden, die währenddessen vom Bediener ausgelöste Verzögerung der vorausfahrenden EVITA und das Auslösen von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen.

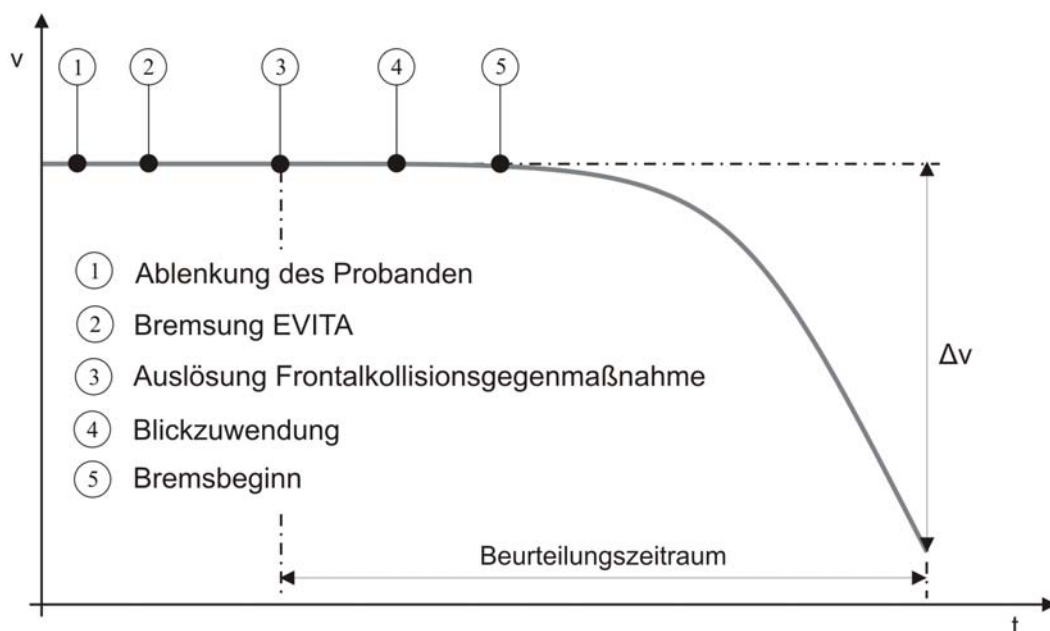


Bild 4-7: Idealisierter Versuchsablauf als Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit des Versuchsfahrzeugs mit Beurteilungszeitraum und Geschwindigkeitsdifferenz

Nach der Auslösung einer Frontalkollisionsgegenmaßnahme erfolgen typischerweise eine Blickzuwendung und eine vom Probanden ausgelöste Fahrzeugverzögerung. Der Beurteilungszeitraum beginnt mit dem Zeitpunkt des Auslösens einer Warnung oder eines Fahrzeugeingriffs. Die Anforderungen an die Dauer des Beurteilungszeitraums lauten:

- So lang, dass die Gesamtreaktionszeit aller Probanden bestimmt werden kann.
- So kurz, dass kein Stillstand des Fahrzeugs beim Abbremsen aus der Versuchsgeschwindigkeit erreicht wird.
- So kurz, dass der Einfluss der stationären Vollverzögerung nicht die Gesamtreaktionszeit überwiegt.

Für die durchgeführten Versuche endet der Beurteilungszeitraum zum Zeitpunkt eines gedachten, ungebremsten Aufpralls des Versuchsfahrzeugs auf das vorausfahrende, ununterbrochen bremsende Dummy Target. Dieser Aufprall ist „gedacht“, da von EVITA automatisch eine Kollision vermieden wird. Der Endzeitpunkt wird in Abhängigkeit des TTC-Algorithmus und der Auslöseschwelle in einem ungebremsten Eich-

versuch ohne Proband bestimmt. Für eine typische Warnung mit dem TTC-Algorithmus beträgt der Betrachtungszeitraum 2 s und entspricht den gestellten Anforderungen. Der einheitliche Zeitpunkt der Aktivierung der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen in den Versuchen wurde unter Kenntnis von Warnzeitpunkten bekannter Frontalkollisionsgegenmaßnahmen definiert.^{66,67} So können Warnelemente sowohl miteinander als auch mit autonomen Bremseingriffen verglichen werden.

Analog zur Wirksamkeit kann eine energetische Wirksamkeitsbetrachtung erfolgen. Die kinetische Energie eines fahrenden Fahrzeugs ist

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.2)$$

mit m als Masse und v als Geschwindigkeit des Fahrzeugs. Die Energiereduktion im Beurteilungszeitraum ist

$$E_{kin, red} = \frac{1}{2}m\Delta v^2 \text{ mit } \Delta v = v_{Ausgang} - v_{Ende} \quad (4.3)$$

Die Kollisionsenergie $E_{kin, Crash}$ ist mit der Masse des Kollisionspartners $m_{Kollisionspartner}$ als Maß der Schwere eines Aufpralls zum Aufprallzeitpunkt definiert:

$$E_{kin, Crash} = \frac{1}{2}mv_{Ende}^2 - \frac{1}{2}m_{Kollisionspartner}v_{Kollisionspartner}^2 \quad (4.4)$$

wenn $(v_{Ende} - v_{Kollisionspartner}) \geq 0$

mit v_{Ende} als Geschwindigkeit des Fahrzeugs am Ende des Beurteilungszeitraums und mit $v_{Kollisionspartner}$ als gegebene Geschwindigkeit des Kollisionspartners zum selben Zeitpunkt. Um in Anlehnung an Crashtests eine Standardisierung der Formel zu geben, wird ein Zusammenstoß auf ein feststehendes, unbewegliches Objekt angenommen (wie etwa eine Wand). $v_{Kollisionspartner}$ wird gleich Null gesetzt. Zusammen mit Formel (4.4) ergibt sich die für die Unfallschwere bestimmende kinetische Crashenergie zu

$$E_{kin, Crash} = \frac{1}{2}m(v_{Ausgang} - \Delta v)^2 \quad (4.5)$$

⁶⁶ Siehe Kodaka, K.: Honda Rear-End Collision Velocity Reducting System, 2003

⁶⁷ Siehe Steiner, M.: S-Klasse von Mercedes-Benz, 2005

mit $v_{Ausgang}$ als Ausgangsgeschwindigkeit zu Beginn des Beurteilungszeitraums. Bei gegebener Geschwindigkeit des Kollisionspartners am Ende des Beurteilungszeitraums geht die Wirksamkeit Δv bei gegebener Fahrzeugmasse m und gegebener Anfangsgeschwindigkeit quadratisch ein. Damit ist ein Zusammenhang zwischen dem Bewertungskriterium Wirksamkeit und der Schwere eines Unfalls hergestellt.

4.4.3 Bewertungskriterien

Mit der Differenzgeschwindigkeit im Beurteilungszeitraum ist das Hauptbewertungskriterium definiert. Es werden weitere zeitliche Kriterien wie unterschiedliche Reaktionszeiten des Fahrers festgelegt, um eine Charakterisierung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen zu erreichen.

In der Literatur gibt es zahlreiche Angaben zur Bestimmung des Fahrerverhaltens in Gefahrensituationen. Dazu geben Bäumler⁶⁸ und Krause⁶⁹ einen Überblick. Die in diesem Kontext verwendete Festlegung von Reaktionszeiten lehnt sich an die für die Versuchsverhältnisse allgemeingültige Definition von Burckhardt⁷⁰ bzw. Zomotor⁷¹ an.

Im Versuch erfolgen zunächst die Ablenkung des Probanden und die Bremsung des Dummy Target. Beim Erreichen der Auslöseschwelle wird die Frontalkollisionsgegenmaßnahme aktiviert. Unter dem Begriff Gesamtreaktionszeit werden die Einzelkriterien Blickzuwendungszeit, Umsetzzeit und Betätigungszeit zusammengefasst. Die Gesamtreaktionszeit beginnt bei der Aktivierung der Frontalkollisionsgegenmaßnahme und endet bei der maximalen Verzögerung des Fahrzeugs. Bild 4-8 zeigt schematisiert den Geschwindigkeitsverlauf des Versuchsfahrzeugs über der Zeit, den Beurteilungszeitraum sowie zeitliche Bewertungskriterien.

⁶⁸ Bäumler, H.: Reaktionszeiten im Straßenverkehr, 2007

⁶⁹ Krause, R.: Mensch und Bremse in Notbremssituationen, 2007

⁷⁰ Burckhardt, M.: Reaktionszeiten bei Notbremsvorgängen, 1985

⁷¹ Zomotor, A.: Fahrwerktechnik – Fahrverhalten, 1987

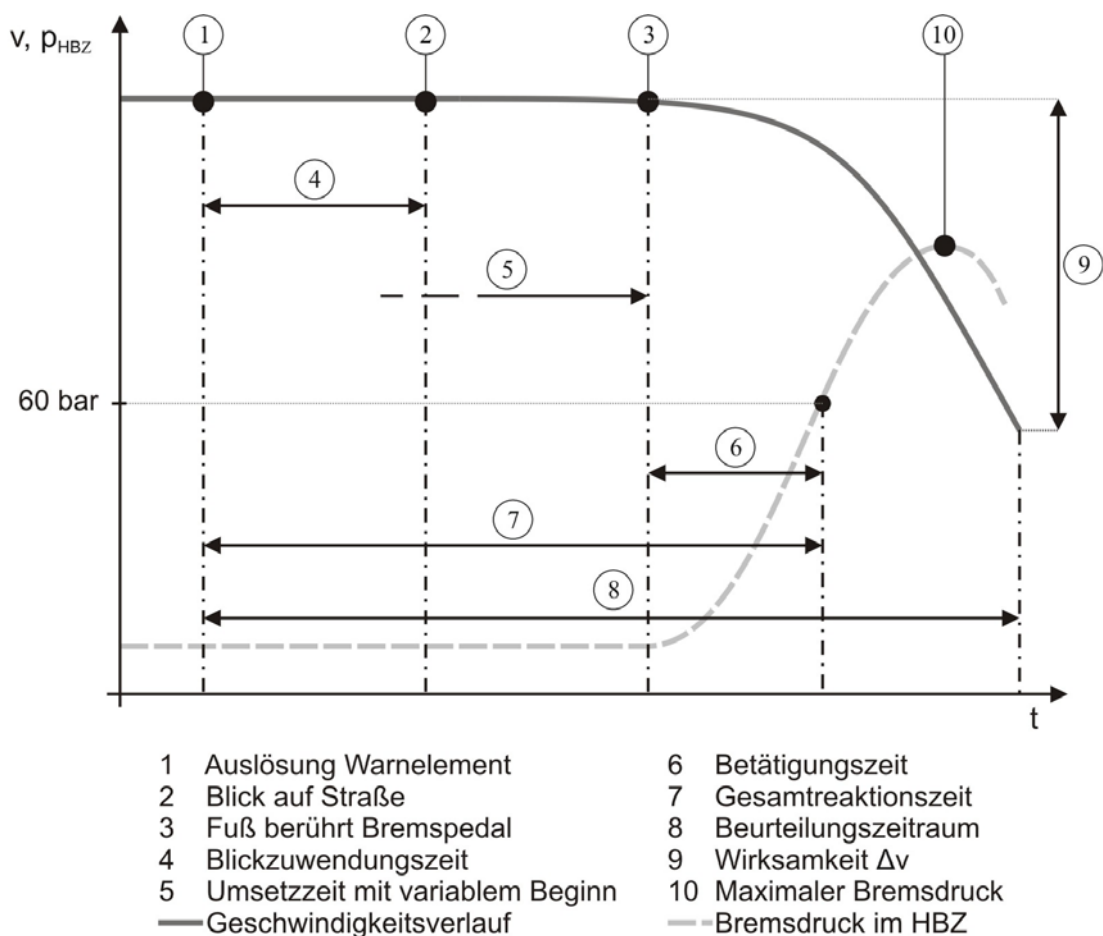


Bild 4-8: Idealisierter Versuchsablauf als Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit des Versuchsfahrzeugs mit zeitlichen Bewertungskriterien

Bild 4-8 zeigt die im Folgenden beschriebenen Bewertungskriterien:

- Der Zeitraum vom Beginn der Auslösung der FKGM bis zum ersten Blick des Probanden auf die Fahrbahn vor dem Ego-Fahrzeug ist als Blickzuwendungszeit definiert und wird aus den Daten der Gesichtskamera ermittelt.
- Die Umsetzzeit des rechten Fußes vom Gaspedal auf das Bremspedal wird aus den Kameradaten berechnet. Sie beginnt beim ersten im Kamerabild erkennbaren Lösen des rechten Fußes vom Gaspedal und endet beim ersten im Kamerabild erkennbaren Kontakt zwischen rechtem Fuß und Bremspedal.
- Die Betätigungszeit beginnt beim ersten Kontakt zwischen rechtem Fuß und Bremspedal und endet beim ersten Überschreiten des Bremsdrucks im Hauptbremszylinder von 60 bar. Ab diesem Zeitpunkt ist die maximale Verzögerung des Fahrzeugs erreicht und die Wirksamkeit ist technisch nur durch den Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn begrenzt.

In Identifizierungsversuchen mit dem Versuchsfahrzeug und hohem Reibwert wurde der Beginn einer ABS-geregelten Vollverzögerung bei einem Druck im Hauptbremszylinder von 60 bar festgestellt. Dies entspricht eine Fahrzeugverzögerung von 10 m/s^2 , die Reibwertausnutzung ist angenähert $\mu=1,0$. Der auf der Teststrecke der Versuche maximal zur Verfügung stehende Reibwert beträgt $\mu=1,15$.^{72,73}

Die Bestimmung des Endzeitpunktes der Gesamtreaktionszeit kann alternativ mit dem Bremspedalweg erfolgen, ab dem eine Vollverzögerung erreicht wird. Begrenzend bei der Bestimmung des Bremspedalwegs ist die Abtastrate der Kamera. Bei der zur Verfügung stehenden Messtechnik würde diese Methode zu einer größeren Ungenauigkeit führen. Weiterhin können die Daten eines Beschleunigungssensors verwendet werden. Das Ende der Gesamtreaktionszeit ist bei einer Beschleunigung von 10 m/s^2 erreicht. Das Signal des serienmäßigen Beschleunigungssensors im Versuchsfahrzeug ist ohne Filterung verrauschter als vom serienmäßigen CAN-Drucksensor, weshalb dem letzteren der Vorzug gegeben wurde. Für eine Standardisierung des Verfahrens und der Übertragung auf andere Versuchsfahrzeuge ist für das Ende der Betätigungszeit die Fahrzeugverzögerung von 10 m/s^2 oder zugehöriger Messgrößen zu ermitteln.

Die zur Bestimmung der Wirksamkeit der Frontalkollisionsgegenmaßnahme benötigte Geschwindigkeitsdifferenz Δv wird aus der Radgeschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs ermittelt und bis zum Ende des Beurteilungszeitraums extrapoliert. Die Extrapolation ist notwendig, da sich bereits in den Vorversuchen gezeigt hat, dass ein Teil der Probanden bereits vor dem Ende des Beurteilungszeitraums die zuvor eingeleitete hohe Verzögerung des Versuchsfahrzeugs merklich reduzierten. Beim Nachfragen hat sich herausgestellt, dass diese Reaktion auf die kollisionsvermeidende automatische Aktion von EVITA zurückzuführen ist: Da das Dummy Target aktiv aus dem Gefahrenbereich gezogen wird und die Differenzgeschwindigkeit bereits von Seiten des Dummy Target zu Null reduziert wird, erkennt ein Teil der Probanden keine Notwendigkeit mehr zum Aufrechterhalten der hohen Verzögerung im Versuchsfahrzeug. Da diese Probandenreaktion in einer Gefahrensituation auf öffentlichen Straßen beim Fortbestehen der Gefahr nicht zu erwartet ist, wird ab dem Ende der Betätigungszeit mit einer konstanten Verzögerung extrapoliert.

Die vergleichende Einschätzung eines Probanden zu verschiedenen Frontalkollisionsgegenmaßnahmen wird als probandenbezogene Wirksamkeit definiert. Neben den zeitlichen Bewertungsgrößen im Falle einer berechtigten Auslösung der Frontalkollisions-

⁷² Niemz, T.: Reducing Braking Distance by Active Dampers, 2006, S.132 ff

⁷³ Versuchsgelände Griesheim, N=35, Anfangsgeschwindigkeit 70 km/h, trockene Fahrbahn, harte Dämpfung und Sommerreifen

gegenmaßnahmen sind das Störungsmaß und die probandenbezogene Verzeihlichkeit definiert. Tabelle 4-3 fasst die Bewertungskriterien zusammen und kennzeichnet die englischen Begriffe.

Tabelle 4-3: Bewertungskriterien

Fahrzeugbezogene Wirksamkeit (Objective effectiveness)	Geschwindigkeitsänderung Δv des Ego-Fahrzeugs im Beurteilungszeitraum
	Bestimmt aus den Daten eines Geschwindigkeitsmessers im auffahrenden Versuchsfahrzeug
Blickzuwendungszeit (Visual distraction time)	Zeitdauer vom Zeitpunkt der Warnung bis zum Blick auf die Straße
	Bestimmt aus den Daten der Kamera auf das Gesicht des Fahrers
Umsetzzeit (Foot movement time)	Zeitdauer von der ersten Bewegung des Fußes vom Gaspedal bis zum ersten Kontakt mit dem Bremspedal
	Bestimmt aus den Daten der Fußraumkamera
Betätigungszeit (Actuation time)	Zeitdauer vom ersten Kontakt des Fußes mit dem Bremspedal bis zum Erreichen eines Bremspedaldrucks von 60 bar
	Bestimmt aus den Daten der Fußraumkamera und einem Drucksensor am Hauptbremszylinder
Störungsmaß (Disturbance)	Geschwindigkeitsänderung Δv des Ego-Fahrzeugs vom Beginn einer Fehlwarnung (ohne Kollisionsgefahr)
	Bestimmt aus den Daten eines Geschwindigkeitsmessers im Versuchsfahrzeug
Probandenbezogene Wirksamkeit (subjective effectiveness)	Probandenbeurteiltes Maß für die Höhe einer kollisionsvermeidenden Wirkung einer FKGM
	Bestimmt per Fragebogen als Rangfolge verschiedener Ausprägungen von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen (Häufigkeit der Präferenz für Platz 1)
Verzeihlichkeit (Forgiveness)	Probandenbeurteiltes Maß einer Frontalkollisionsgegenmaßnahme bei einer Fehlwarnung/nicht-berechtigten Eingriff
	Bestimmt per Fragebogen als Rangfolge verschiedener Ausprägungen von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen (Häufigkeit der Präferenz für Platz 1)

4.4.4 Vergleiche von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen

Das einheitliche Bewertungsverfahren ist Grundlage für den Vergleich verschiedener Ausprägungen von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen. Für die Bewertung werden mit einem entsprechend geteilten Kollektiv von Probanden Testfahrten durchgeführt. Der Vergleich der über alle Probanden ermittelten Geschwindigkeitsreduktionen im Beurteilungszeitraum gibt die Wirksamkeit der Varianten wieder. Eine Beurteilung der absoluten Wirksamkeit eines Antikollisionssystems ist durch die Verwendung einer sogenannten *Baseline* zu erreichen. Dabei wird ein Teil des Probandenkollektivs ohne einen Eingriff des Antikollisionssystems mit der kritischen Situation konfrontiert und die Geschwindigkeitsdifferenz bestimmt. Für die Bewertung der Wirksamkeit des Antikollisionssystems ist nur der erste Versuch des Probanden eine unbeeinflusste Basis. Bei allen weiteren Versuchen hat der Proband, trotz einer lückenhaften Vorinformation über den eigentlichen Versuchszweck, den Versuchsgegenstand einer überraschenden Notsituation verstanden, er gilt als voreingenommen.

Der Bewertung der Akzeptanz durch den Fahrer kommt bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen mittlerweile eine große Beachtung zu.⁷⁴ Die weiteren Versuche nach der ersten Notsituation eignen sich zum Erzeugen ergänzender Erkenntnisse, wie etwa der Umgang mit nicht berechtigten Auslösungen von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen oder die vergleichende Probandeneinschätzungen der Varianten. Die Probandeneinschätzung zur erlebten Situation und zur Bewertung der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen wird mit Fragebögen ermittelt. Aus der Auswertung der Bewertung werden Hinweise zur Gestaltung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen gezogen.

4.4.5 Auswertungsverfahren

Im vorigen Abschnitt wurde die Notwendigkeit einer Extrapolation ab dem Ende der Betätigungszeit erklärt: Wegen einer kollisionsvermeidenden Aktion von EVITA neigen Probanden zum Verringern der eingeleiteten Fahrzeugverzögerung. Aus dieser Tatsache ergibt sich die Notwendigkeit der Kompensation, indem die Fahrzeugverzögerung rechnerisch aufrechterhalten wird. Ab dem Ende der Gesamtreaktionszeit (max. Verzögerung ist erreicht) ist die Geschwindigkeitsdifferenz vor einer Kollision durch den Reibwert begrenzt. Es existieren zwei gangbare Lösungen: Zum ersten kann die gemessene Geschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs bis zum Ende des Beurteilungszeitraums extrapoliert werden. Zum anderen kann ab dem Ende der Gesamtreaktionszeit mit einer konstanten Fahrzeugbeschleunigung die gesamte Geschwindigkeitsdifferenz bestimmt werden.

⁷⁴ Bubb, H.: Fahrversuche mit Probanden, 2003

Die für die Ermittlung der Ergebnisse angewendete Methode nutzt die Berechnung der Wirksamkeit anhand der konstanten Fahrzeugbeschleunigung. Für die Berechnung wird eine Verzögerung von $a=10 \text{ m/s}^2$ entsprechend einem mittleren Reibwert von näherungsweise $\mu=1,0$ angenommen. Der Beginn der Extrapolation entspricht dem Endzeitpunkt der Gesamtreaktionszeit und der Betätigungszeit (vgl. Bild 4-8). Bild 4-9 zeigt die einzelnen Geschwindigkeitsdifferenzen im Beurteilungszeitraum.

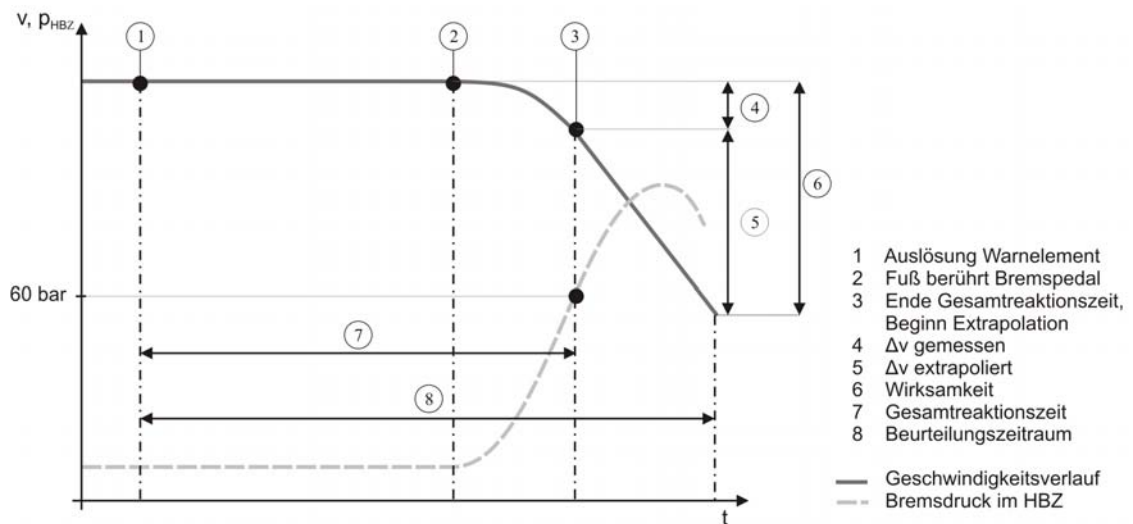


Bild 4-9: Auswertungsverfahren zur Bestimmung der Wirksamkeit

Zur Bestimmung der Wirksamkeit werden zunächst die Gesamtreaktionszeit und die bis zum Ende der Gesamtreaktionszeit erzielte Geschwindigkeitsdifferenz bestimmt (siehe Punkt 4). Im nächsten Schritt wird die bis zum Ende des Beurteilungszeitraums mit einer Vollverzögerung erzielte Geschwindigkeitsdifferenz errechnet (siehe Punkt 5). Die endgültige Wirksamkeit ergibt sich aus der Summe Δv beider Geschwindigkeitsdifferenzen, gemäß Formel 4.6, mit t_{G-R} als Abkürzung für die Gesamtreaktionszeit, D_{mittel} als mittlere Beschleunigung beim Bremsen (Deceleration) und t_B als Dauer des Beurteilungszeitraums:

$$\Delta v = \Delta v_{(t_{G-R})} + D_{mittel} * (t_B - t_{G-R}) \quad (4.6)$$

Gegenüber dem Verfahren der Extrapolation der realen Fahrzeuggeschwindigkeit ergeben sich Vorteile bei der Robustheit gegen Fehler. Bild 4-10 zeigt die Extrapolation der gemessenen Fahrzeuggeschwindigkeit im Beurteilungszeitraum. Dabei wird die Geschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs im Bereich der maximalen Verzögerung bis zum Ende des Beurteilungszeitraums extrapoliert. Erkennbar ist die Unterbrechung der fahrereingeleiteten Verzögerung vor dem Ende des Beurteilungszeitraums. Die Durchführung dieses Verfahrens ist größtenteils automatisiert. Bei diesem Verfahren wird der Bereich der Stützstellen für die Extrapolationsgerade umso kleiner, je länger die Gesamtreaktionsdauer des Fahrers ist, da die Zeitdauer der linearen Verzögerung im Beurteilungszeitraum kürzer ist. Weiterhin ist dieses Verfahren nicht unabhängig von Witterungseinflüssen. Dieser Nachteil kann hingenommen werden, wenn die Versuche bei konstanter trockener Witterung durchgeführt werden. Im Rahmen einer Standardisierung des Verfahrens überwiegt der Vorteil einer Berechnung, zumal das Auswertungsverfahren vereinfacht ist.

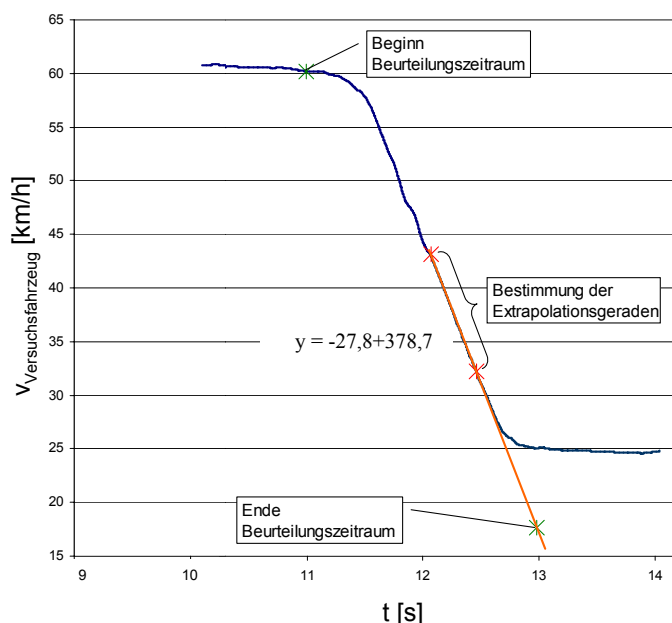


Bild 4-10: Extrapolation der gemessenen Fahrzeuggeschwindigkeit im Beurteilungszeitraum

5 Hypothesenbildung

Das Postulat aus Kapitel 3.3 kennzeichnet das wissenschaftliche Ziel der Forschungsarbeit: Es ist möglich, Frontalkollisionsgegenmaßnahmen im realen Fahrversuch mit Probanden und mit der Erzeugung kritisch erscheinender Situationen einzuordnen und bezüglich ihrer Wirksamkeit zu bewerten.

Nachdem das erstellte Verfahren mit den Bewertungskriterien in Kapitel 4 erläutert wurde, folgt die Definition von falsifizierbaren Hypothesen zum Überprüfen der Hauptfragestellung. Um eine universelle Aussage über die Eigenschaften der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen zu erhalten, wird zunächst für alle zum Test bereitstehenden Varianten angenommen, dass sie jeweils die beste Eigenschaft haben. Wenn also die Variante i tatsächlich die beste wäre, dann dürfte ein relevanter und valider Test niemals ein Ergebnis liefern, bei dem die Variante j besser als i wäre. Liegt aber ein solches Ergebnis nach dem Test vor, so kann ausgeschlossen werden, dass i die beste Variante sein kann. Diese Aussage für i besitzt universelle Gültigkeit. Hingegen lässt sich für j aus diesem Ergebnis noch keine universelle Aussage ableiten. Immerhin konnte sich die Annahme (j besitzt die beste oder zumindest eine besser Eigenschaft als i) bei einem wie hier angenommenen Ergebnis bewähren. Dieses Vorgehen folgt Poppers Logik der Forschung.⁷⁵ Die Hypothesen werden als Alternativhypothesen formuliert. Die Alternativhypothese enthält das Urteil, dass sich die Eigenschaften unterscheiden. Fällt die Entscheidung zugunsten der Alternativhypothese, so muss eine Absicherung gegen den α -Fehler durchgeführt werden.⁷⁶

5.1 Wirksamkeit

Als Hauptbewertungsgröße wurde die Wirksamkeit einer Frontalkollisionsgegenmaßnahme definiert. Mit der Hypothese 1 wird überprüft, ob eine Rangfolge bezüglich der fahrzeugbezogenen Wirksamkeit existiert.

⁷⁵ Popper, K.: Logik der Forschung, 2005

⁷⁶ Bubb, H.: Probandenanzahl in Fahrversuchen, 2003, S. 31

Hypothese 1: Wirksamkeit

Es existiert eine Rangfolge bzgl. der Wirksamkeit der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen.
--

Die Spekulation ist, mit einem validen statistischen Prüfverfahren (Varianzanalyse bzw. T-Test) eine eindeutige Rangfolge der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen zu ermitteln, welche dann als bewährt gilt. Alle anderen Rangfolgen der Wirksamkeit der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen sind in diesem Fall falsifiziert.

Hypothese 2 betrachtet die Probandeneinschätzung zur Wirksamkeit.

Hypothese 2: Probandenbezogene Wirksamkeit

Es existiert eine Rangfolge bzgl. der probandenbeurteilte Wirksamkeit der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen.
--

5.2 Störungsmaß

Die Auswirkungen einer nicht-berechtigten Auslösung werden mit Hypothese 3 beschrieben. Das Störungsmaß ist invers zur Verzeihlichkeit und bewertet die Geschwindigkeitsreduktion im Beurteilungszeitraum in einem Versuch ohne Kollisionsgefahr.

Hypothese 3: Störungsmaß

Es existiert eine Rangfolge bzgl. des Störungsmaßes der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen.
--

Neben der objektiv messbaren Geschwindigkeitsreduktion wird das probandenbezogene Störungsmaß als Verzeihlichkeit bewertet.

Hypothese 4: Verzeihlichkeit

Es existiert eine Rangfolge bzgl. der Verzeihlichkeit der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen.
--

5.3 Reaktionszeiten

Für eine genauere Untersuchung der Effekte bezüglich der Wirksamkeit der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen werden weitere Hypothesen aufgestellt. Nachdem die Rangfolge bzgl. der Wirksamkeit mit der vorhergehenden Hypothese ermittelt wird, erfolgt eine Aufteilung des Notbremsvorgangs in Aktionsprozessen des Fahrers.

Hypothese 5: Blickzuwendungszeit, Umsetzzeit und Betätigungszeit
Es existiert eine Rangfolge der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen bzgl. der Blickzuwendungszeit, der Umsetzzeit, der Betätigungszeit und der Gesamtreaktionszeit.

5.4 Korrelationen

Mit Hypothese 6 wird ein Zusammenhang zwischen der Wirksamkeit eines Warnelements und Störungsmaß untersucht. Die Begriffe Störungsmaß und Verzeihlichkeit sind invers.

Hypothese 6: Korrelation zwischen Wirksamkeit und Störungsmaß
Je weniger wirksam die Frontalkollisionsgegenmaßnahme ist, desto weniger störend ist sie.

Die Hypothesen bilden die Grundlage der Untersuchungen zu unterschiedlichen Frontalkollisionsgegenmaßnahmen. Auf die Ergebnisse der Untersuchungen wird im Kapitel 8 eingegangen.

6 Entwicklung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen

Nachdem in den vorangegangenen Kapitel das Darmstädter Test- und Bewertungsverfahren mit EVITA und den zugehörigen Bewertungskriterien definiert und passende Hypothesen entwickelt wurden, erfolgt im vorliegenden Kapitel, gemäß dem Aufbau der Arbeit (siehe Bild 1-1), das Vorstellen einer Methodik zum Entwickeln von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen. Dazu wird nach einer Einteilung der Sinneskanäle und Hinweisen auf Leitlinien zur Entwicklung von FKGM die EVITA-Entwicklungsmethodik vorgestellt. Es schließt sich die Beschreibung der im Probandenversuch untersuchten Frontalkollisionsgegenmaßnahmen an.

6.1 Grundlagen zur Entwicklung von FKGM

Menschen nehmen Informationen oder Reize über ihre sensorischen Organe auf. Diese Organe haben unterschiedliche Empfindlichkeiten und Betriebsbereiche (siehe Kapitel 1). Die Einteilung der menschlichen Sinneskanäle kann gemäß der Response-Checkliste in fünf Klassen erfolgen:⁷⁷

1. Visueller Sinneskanal
2. Auditiver Sinneskanal
3. Haptischer Sinneskanal
 - a) taktiler Sinneskanal
 - b) kinästhetisch-vestibulärer Sinneskanal
4. Olfaktorischer Sinneskanal
5. Gustatorischer Sinneskanal

Für die Anwendung im Kraftfahrzeug werden hauptsächlich die ersten drei Sinneskanäle für FAS verwendet. Der visuelle und der auditive Sinneskanal werden in vielfältiger Weise für das Übermitteln von Warnungen verwendet. In Kapitel 2.1 sind Beispiele dafür aufgeführt. Von manchen neueren FAS wird gezielt der haptische Sinneskanal zur Übermittlung von Warnungen verwendet. Der haptische Sinneskanal unterteilt sich in die taktile und die kinästhetische Wahrnehmung.

⁷⁷ PReVENT, Response-Checkliste, 2006

Teil der kinästhetischen Wahrnehmung durch die Propriozeptoren⁷⁸ ist die vestibuläre Wahrnehmung durch das Gleichgewichtsorgan im Innenohr und Kleinhirn. Die Bedeutung des olfaktorischen und der gustatorischen Sinneskanals ist für die Übermittlung von Warnungen unbedeutend, da keine Warnelemente gezielt für diese Sinneskanäle bekannt sind. Auf eine Beschreibung der speziellen Eigenschaften der fünf Sinneskanäle in Bezug auf die Anwendung für Warnelemente wird im Folgenden eingegangen.

Eine der wichtigen Eigenschaften der Sinneskanäle für die Übermittlung von Warnungen ist die Frage, welche Information mit welcher Komplexität übermittelt werden soll. Die übertragbare Informationsrate ist ein Maß für diese Eigenschaft und kann in bits/s bestimmt werden. Zum anderen ist die Zeitdauer von der Ausgabe der Warnung eines technischen Systems bis zum Beginn der Wahrnehmung beim Menschen eine die Reaktionszeit bestimmende Größe. Diese Größe wird im folgenden Wahrnehmungsverzugszeit genannt. Tabelle 6-1 teilt ausgewählte Kriterien den Sinneskanälen zu. Diese Eigenschaften haben die Sinneskanäle unter optimalen Bedingungen.

Tabelle 6-1: Qualitative Bewertung ausgewählter Eigenschaften der Sinneskanäle, angelehnt an Physiologie⁷⁹ und Mensch-Maschine-Systeme⁸⁰

Sinneskanal	Eigenschaften		
	Alternative Namensgebung	Informationsrate	Wahrnehmungsgeschwindigkeit
Visuelle Kanal	Sehsinn	sehr hoch	schnell
Auditiver Kanal	Hörsinn	mittel	mittel
Taktiler Kanal	Tastsinn	niedrig	sehr schnell
Kinästetisch-vestibulärer Kanal	Stellungs- und Bewegungssinn	niedrig	sehr schnell

Neben den in der Tabelle beschriebenen Eigenschaften weist jeder Sinneskanal weitere spezifische Besonderheiten auf, die in den Grundlagenwerken Physiologie⁸¹ und Mensch-Maschine-System⁸² weiterführend erklärt werden.

⁷⁸ Auch Tiefenwahrnehmung genannt; lateinisch proprius = eigen; recipere = aufnehmen

⁷⁹ Schmidt, R.: Physiologie des Menschen, 2000

⁸⁰ Johanssen, G.: Informationsübertragungsprozesse, 1993

⁸¹ Schmidt, R.: Physiologie des Menschen, 2000

⁸² Johanssen, G.: Informationsübertragungsprozesse, 1993

Es existieren zahlreiche Quellen, um Anforderungen an Warnelemente zu definieren, die zumeist aus dem Bereich der Arbeitswissenschaften bekannt sind. Im Folgenden werden einige der bekanntesten Standardisierungen zur Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen benannt. Dabei wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben, vielmehr wird ein Überblick über zu berücksichtigende Aspekte gegeben. König beschreibt Leitlinien zur Entwicklung von FAS näher.⁸³

Im Allgemeinen ergeben sich Anforderungen an Warnelemente aus drei Gruppen:

1. Normen & Standards,
2. Richtlinien,
3. Produktentwicklungsprozess.

Zu 1. Normen stellen Mindestanforderungen an das Produkt. Relevanz für Warnelemente hat - neben anderen Normen - ISO 15623.⁸⁴ Sie ist gezielt auf Antikollisionssysteme ausgerichtet. In ihr werden explizit Anforderungen an optische und akustische Warnungen definiert. Weitere Normen für auditive und visuelle Anwendungen sind Normen zu auditiven und visuellen Darstellungen im Fahrzeug.^{85, 86}

Zu 2. Richtlinien enthalten Forderungen und geben die Anwendung von Methoden vor. Bei der Entwicklung von FAS ist den Entwicklern zu raten, bestehende Richtlinien zu berücksichtigen. Eine derartige Richtlinie ist beispielsweise die im Rahmen von PREVENT erstellte RESPONSE-Checkliste⁸⁷ in der unter anderem Hinweise zur Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen für FAS gegeben werden. Die Checkliste berücksichtigt im Wesentlichen akustische, optische und mechanische Mensch-Maschine-Schnittstellen.

Zu 3. Nach der VDI-Norm 2222 und 2225 werden Anforderungen im Produktentwicklungsprozess (PE-Prozess) mit verschiedenen Methoden generiert.⁸⁸ Im Gegensatz zu Normen, Standards und Richtlinien kann der PE-Prozess gezielt auf die Anwendung des warnenden FAS ausgerichtet werden.

⁸³ Winner, H.: Handbuch FAS, erscheint 2009

⁸⁴ FWWS – Forward Vehicle Collision Warning System

⁸⁵ ISO/CD15006-1: Auditory information presentation

⁸⁶ ISO/DIS15008-1: Visual presentation of information

⁸⁷ PREVENT, Response-Checkliste, 2006

⁸⁸ VDI 2222, 1996 und VDI 2225, 1977, www.vdi.de

Exemplarisch werden in Tabelle 6-2 einige wichtige generelle Anforderungen an Warn-elemente aufgeführt. Diese Anforderungen sind unabhängig von der Realisierung des Warnelements und des verwendeten Sinneskanals, sie werden daher nicht-funktionale Anforderungen genannt.

Tabelle 6-2: Ausgewählte Anforderungen

Anforderung	Beschreibung
Beeinträchtigungen, Betriebsbereiche	Für jedes Warnelement gilt die Forderung, gesundheitliche Beeinträchtigungen des Menschen durch die Einwirkung auszuschließen. Vielmehr sind spezifische Betriebsbereiche (Informationsraten, Wahrnehmungsgeschwindigkeit, Intensitäten, etc.) zu berücksichtigen.
Art und Anpassung der Warnung	Um vielfältige Warnungen bezüglich ihrer Art und Dringlichkeit zu unterscheiden, ist es erforderlich, die Art der Warnung an die bestehende Gefahr anzupassen. Eine Kollisionswarnung erfolgt anders als eine Fahrstreifenverlassenswarnung. Bezüglich der Dringlichkeit einer Warnung wird eine Adaptivität gefordert, sodass bei zeitlich näher liegender Gefahr eine höhere Dringlichkeit erreicht wird
Bloßstellung	Ein Wunsch im Entwicklungsprozess kann sein, eine Einwirkung der Warnung auf andere Insassen auszuschließen, sodass „Bloßstellungseffekte“ des Fahrers gegenüber Mitinsassen durch das Warnsystem ausbleiben. Der Effekt der Bloßstellung kann sowohl bei berechtigten als auch bei nicht-berechtigten Warnungen auftreten. Aus diesem Grund wird eine Fahrstreifenverlassenswarnung bei LKW mit einer akustischen Warnung ausgeführt, beim Bus hingegen als Sitzvibration. ^{89,90}

6.2 EVITA-Entwicklungsmethodik für FKGM

Im Produktentwicklungsprozess (PE) zur Entwicklung von Warnelementen erfolgt im Anschluss an die Definition von Anforderungen die Lösungssuche unter Anwendung unterschiedlicher Methoden. Als Ergebnisse liegen typischerweise mehrere Lösungsmöglichkeiten vor. Im weiteren PE-Prozess gilt es, die Anzahl der Varianten zu reduzieren. Dazu müssen geeignete Kriterien zur Verfügung stehen. Zur Reduktion der Varianten von Fahrerwarnelementen für warnende FAS werden die Kriterien Informationsgehalt, Abdeckungsrate und Verzeihlichkeit zur Reduktion der Variantenzahl eingeführt.

⁸⁹ DaimlerChrysler AG: Rettendes Rattern, 2000

⁹⁰ Dörner, K.: FAS MAN, 2006

Der Informationsgehalt einer Nachricht ist eine Größe, die angibt, wie viel Information in dieser übertragen wurde. Das Kriterium Abdeckungsrate ist ein Maß für die Verfügbarkeit eines Sinneskanals vom Warnelement zum Fahrer, wodurch ein Fahrer die Möglichkeit zur Reaktion auf die Warnung erhält. Die Verzeihlichkeit beurteilt den Grad der Entschuldbarkeit einer Fehlwarnung. Tabelle 6-3 listet die erstellten ordinalen Kriterien auf.

Tabelle 6-3: Erstellte ordinale Kriterien für die Voreinteilung von warnenden FKGM

Informationsgehalt	Verzeihlichkeit	Abdeckungsrate
aufmerksamkeitserregend	sehr verzeihlich	hoch
hinweisend auf die Situation	verzeihlich	mittel
hinweisend auf die Aktion	weniger verzeihlich	niedrig

Eine Herausforderung bei der Entwicklung von Warnelementen ist die Festlegung des Einsatzzeitpunkts des Warnelements vor einer Kollision unter Berücksichtigung des sogenannten Warndilemmas. Das Warndilemma bezieht sich darauf, dass eine Warnung des Fahrers umso wirksamer ist, je früher die Warnung vor einer Kollision ausgegeben wird. Bei heutigen Systemen ist allerdings die Gefahr einer Fehlalarmierung umso größer, je früher die Warnung ausgegeben wird, da die Situation von einem Umfelderkennungssystem weniger exakt interpretiert werden kann. Hingegen wird die Akzeptanz eines Warnsystems erwartungsgemäß umso höher ausfallen, je weniger Fehlalarme das System produziert.

Die oft gegenläufige Forderung an warnende FAS lautet: Mit einer maximalen Abdeckungsrate möglichst spät und effektiv und mit einer hohen Verzeihlichkeit zu warnen.

Um warnende Frontalkollisionsgegenmaßnahmen im Entwicklungsprozess gemäß ihrer Eignung einzuteilen, wird die Einordnung des Warnelements anhand der in der Tabelle 6-3 zusammengefassten Kriterien vorgenommen und dem Einsatzzeitpunkt früh, mittel und spät vor einer Kollision zugeordnet. Jede der Lösungsvarianten für eine warnende Frontalkollisionsgegenmaßnahme wird von den am PE-Prozess beteiligten Entwicklern mit den erstellten Kriterien beurteilt. Zwischen den Kriterien werden Verknüpfungen definiert:

- Je geringer die Abdeckungsrate einer warnenden Frontalkollisionsgegenmaßnahme ist, desto früher muss es eingesetzt werden, um Zeit für weitere Warnungen o.Ä. zu lassen.

- Je besser ein Warnelement auf die Gefahr hinweist, desto später ist es einsetzbar, da die Reaktionszeit kürzer ist.
- Je verzeihlicher ein Warnelement ist, desto früher ist es einsetzbar, da eine Fehlwarnung weniger störend ist.

Diese Verknüpfungen werden in drei zweidimensionalen Matrizen (Portfolio-Diagramme) festgehalten. Als Bewertung steht ein schwarz-weiß-Kriterium (Kreuz und Haken) zur Verfügung. Der Einsatzzeitpunkt früh, mittel oder spät wird zugeordnet.

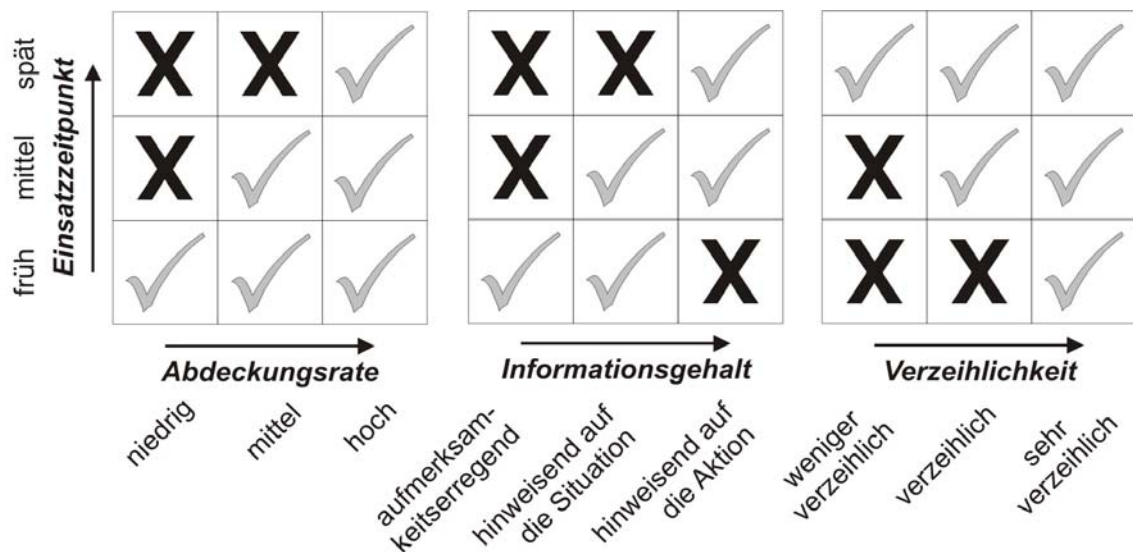


Bild 6-1: Portfolio-Diagramm (Haken geeignet, Kreuz nicht geeignet)

Ein Kreuz bedeutet, dass eine warnende Frontalkollisionsgegenmaßnahme an dieser Stelle nicht geeignet wäre. Der Haken veranschaulicht einen belegbaren Bereich. Als Beispiel zur Verknüpfung sei genannt: Bei einer geringen Verzeihlichkeit können warnende Frontalkollisionsgegenmaßnahmen mit einem Hinweis auf die Aktion nicht zu einem frühen Zeitpunkt eingesetzt werden. Die drei zweidimensionalen Matrizen werden mit einer Schnittmengenbildung ihrer Zuordnung zum Einsatzzeitpunkt in eine dreidimensionale Matrix überführt, die die Grundform der Verträglichkeitsmatrix in Bild 6-2 bildet.

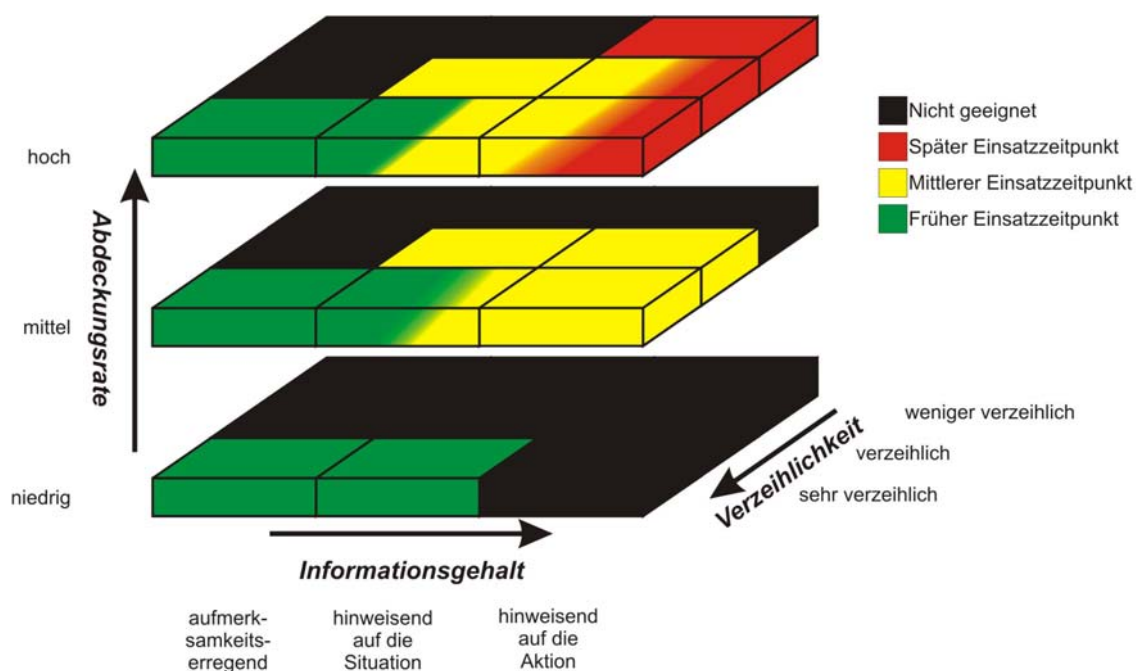


Bild 6-2: Verträglichkeitsmatrix zur Beurteilung des Einsatzzeitpunkts von Warnelementen

Jede warnende Frontalkollisionsgegenmaßnahme kann bezüglich der zuvor stattgefundenen Bewertungen in die Verträglichkeitsmatrix eingeordnet werden. Aus der Einordnung wird ersichtlich, zu welchem Zeitpunkt einer Kollisionswarnung die warnende Frontalkollisionsgegenmaßnahme eingesetzt werden kann. Außerdem wird eine Potentialanalyse durchgeführt, damit die Schwachpunkte deutlich werden und eine Optimierung in die gewünschte Richtung erfolgen kann.

Beispiel: Ein Auditory Icon ist ein begriffliches Geräusch, wie etwa das im Rahmen der Untersuchung getestete Reifenquietschen bei einer Vollverzögerung mit blockierenden Rädern. Der Informationsinhalt ist hinweisend auf eine Situation, da der Fahrer ein mit blockierenden Rädern voll verzögerndes Fahrzeug in seiner Umgebung erwartet. Die Abdeckungsrate ist bei entsprechender Lautstärke des Geräuschs und einer Platzierung der Lautsprecher im Bereich des Cockpits hoch. Die Verzeihlichkeit ist als mittel zu bewerten, da der Fahrer bei einer Fehlwarnung zunächst irritiert sein kann, aber vermutlich keine übermäßige Reaktion, wie beispielsweise eine Vollbremsung, durchführen wird. Gemäß der Verträglichkeitsmatrix eignet sich das Warnelement für einen frühen bis mittleren Einsatzzeitpunkt. Nähere Beschreibungen zu Auditory Icons befinden sich bei Graham und Fricke.^{91, 92}

⁹¹ Graham, R.: Auditory Icons as emergency warnings, 1999, S. 1233

⁹² Fricke, N.: Semantik von Warnmeldungen, 2006, S. 133

Zusammenfassend stellt die Verträglichkeitsmatrix ein Handwerkszeug zur Filterung der Variantenflut von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen, zur Festlegung eines Einsatzzeitpunktes und zum Bestimmen der Optimierungsrichtung dar.

6.3 Untersuchte Frontalkollisionsgegenmaßnahmen

Die Vielzahl an Varianten zu Frontalkollisionsgegenmaßnahmen wurde mit Hilfe der Methodik aus dem vorangegangenen Kapitel eingeschränkt. Als Ergebnis der Vorbewertung stehen sechs FKGM für weitergehende Untersuchungen zur Verfügung. Mit der Auswahl wird die Bandbreite von FKGM in Anlehnung an Seriensysteme bis zu neuartigen FKGM abgedeckt. Exemplarisch für FKGM in Anlehnung an Seriensysteme sind *Symbol*, *Jerk* und *Partial*, während Erkenntnisse aus Anwendungen der FKGM *Seat Vibration*, *Sound* und *Full* bisher nicht oder nur wenig bekannt sind. In Vorversuchen mit Probanden wurden die spezifischen Parameter zu jeder FKGM ermittelt und für die anschließenden Hauptversuche festgelegt. Das vorliegende Kapitel beschreibt die technische Realisierung und Ausprägung der ausgewählten FKGM.

6.3.1 Sitzvibration & Symbol

Eine Sitzvibration ist als Fahrstreifenverlassenswarnung beim AFIL-Spurassistenten von Citroën bekannt. Für die Anwendung als Frontalkollisionsgegenmaßnahme wurde die Quelle der Vibration in die Mitte der Sitzfläche unterhalb des Übergangs von Oberschenkel auf das Gesäß gelegt. Die Vibration des Sitzes wird durch einen 12 V-Elektromotor mit einer exzentrischen Massenverteilung auf der Welle erreicht. Die maximale Leistung des Motors liegt bei ca. 25 Watt. Die Dauer der Warnung beträgt eine Sekunde.

Visuelle Warnungen sind als Frontalkollisionsgegenmaßnahme bekannt (siehe Kapitel 2.1). Für das Versuchsfahrzeug wurde ein eigens entwickeltes Symbol auf einem Zusatzbildschirm dargestellt. Die visuelle Warnung durch ein Symbol wird auf einem TFT-Monitor abgebildet, der an einen PC angeschlossen ist. Der sichtbare



Bild 6-3: TFT-Bildschirm im Fahrzeug



Bild 6-4: Symbol zur Fahreralarmierung

Bereich des Displays beträgt 97 x 64 mm². Bild 6-3 zeigt das Display im Armaturenbrett aus der Sicht des Fahrers. Das Display ist mit einer Folie zur Minimierung der Lichtreflexionen der Umgebung versehen. Die Lichtdurchlässigkeit beträgt nach Herstellerangaben über 90 %. Auf Grundlage eines Verkehrszeichens nach der StVO wurde ein Warnsymbol entwickelt. Die Vorzüge liegen in der Bekanntheit der Darstellung und der grundsätzlich guten Erkennbarkeit. Das Symbol wurde an die ISO 15623⁹³ angepasst. Bild 6-4 zeigt das Symbol. ISO 15623 fordert eine schnell blinkende Darstellung für eine akute Kollisionswarnung. Deshalb erscheint das Symbol dreimal innerhalb von 2 s, wobei das Symbol jeweils für 0,4 s erscheint.

6.3.2 Soundausgabe

Als akustische Warnung ist das Auditory Icon „Reifenquietschen“ verbaut. Auditory Icons sind begriffliche Geräusche mit einer inhärenten Bedeutung.⁹⁴ Abhängig vom Grad der Assoziation mit einem Auditory Icon ist eine schnellere Informationsverarbeitung möglich, die zudem geringere kognitive Ressourcen beansprucht.⁹⁵ In verschiedenen Untersuchungen wurde zudem eine Verbesserung der Reaktionszeit, sowie ein geringerer Lernaufwand gegenüber konventionellen Tönen beobachtet.⁹⁶ Die akustische Warnung erfolgt über einen nach oben gerichteten Lautsprecher in der Mitte des Armaturenbretts. Mit dieser Einbausituation kommen die Schallwellen aus der Richtung der Gefahr. Bild 6-5 zeigt den Einbauort des Lautsprechers. Der Effektivwert des Schalldruckpegels beträgt 90,8 dB(A), die Dauer der Einspielung 0,95 s. Bei der Versuchsgeschwindigkeit von 60 km/h beträgt der Schalldruckpegel im Versuchsfahrzeug 57,1 dB(A).



Bild 6-5: Lautsprecher für die Soundausgabe im Armaturenbrett

⁹³ ISO 15623 Collision Warning, 2001

⁹⁴ Gaver, W.W.: Ecological approach to auditory event perception, 1993 und Lucas: Communicative ability of Auditory Icons, 1994, S. 285-313, nach Fricke: Semantik von Warnmeldungen, VDI-Berichte 1960, 2006, S. 141

⁹⁵ Fricke, N.: Semantik von Warnmeldungen, VDI-Berichte 1960, 2006, S. 141

⁹⁶ Graham, R.: Use of Auditory Icons as emergency warnings, 1999 und Ulfvengren: A comparison of sounds in a cognitive approach to auditory alert design, S. 313-331, 2000 nach Fricke, N.: Semantik von Warnmeldungen, VDI-Berichte 1960, 2006, S. 141

6.3.3 Bremsruck

Bremseingriffe im Versuchsfahrzeug wurden durch CAN-Zugriff auf die serienmäßige ESP-Einheit realisiert. Die Hydraulikpumpe ist für die Anwendung des im Versuchsfahrzeug serienmäßig verbauten Antikollisionssystems mit Bremsengriff bis 6 m/s^2 dimensioniert und erzielt einen Beschleunigungsaufbau von etwa 10 m/s^3 . Bild 6-6 zeigt den Verlauf der Geschwindigkeit und der Verzögerung bei der Auslösung eines Bremsrucks.

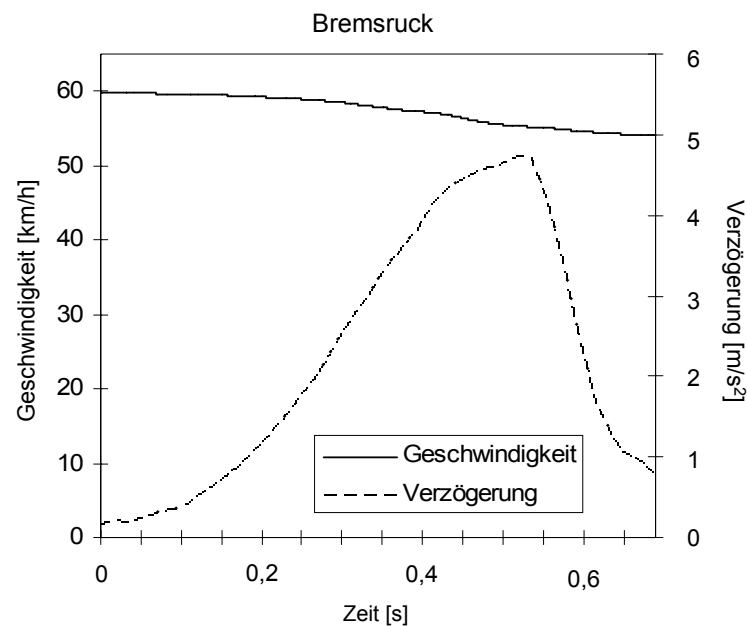


Bild 6-6: Geschwindigkeits- und Verzögerungsverlauf beim Bremsruck

Für eine Zeitdauer von 0,5 s wird eine Verzögerung von max. 5 m/s^2 aufgebaut. Die durch die Teilverzögerung erzielte Geschwindigkeitsdifferenz beträgt 5,5 km/h.

Das Warnelement Bremsruck ist in anderer Form von Färber und Maurer bekannt.⁹⁷ Die Ergebnisse dieser durchgeführten Untersuchung finden sich zumindest teilweise in der Realisierung des Audi Braking Guard wieder.⁹⁸ Die Versuche wurden mit einer elektrohydraulischen Bremse (EHB) durchgeführt. Aus diesem Grund sind die möglichen Schwellzeiten deutlich kürzer als bei der Verwendung einer konventionellen ESP-Pumpe für den Druckaufbau.

⁹⁷ Färber, B.: Fahrerverhalten bei ANB, 2005

⁹⁸ Vgl. Kapitel Stand der Technik, Kapitel 2.1

Lerner und Eckstein beurteilen die Verwendung des haptischen Sinneskanals für Warnungen als sehr positiv, da es sich um eine gerichtete Information und damit größtenteils um einen fertigkeitbasierten Prozess handelt, wozu kaum zusätzliche Ressourcen (siehe auch Bild 1-4) zur Handlungsauswahl benötigt werden.⁹⁹

6.3.4 Teilverzögerung

Voruntersuchungen mit der Teilverzögerung zeigten bei Probanden eine Gesamtreaktionszeit von bis zu 1,1 s. Die Dauer der Teilverzögerung wurde mit 1,3 s gewählt, da anzunehmen ist, dass alle Probanden nach dieser Zeit im Falle einer berechtigten Auslösung selbstständig eine Vollverzögerung einleiten. Im Falle einer nicht berechtigten Auslösung ist eine hohe Verzeihlichkeit anzustreben, was erwartungsgemäß mit einer kürzeren Eingriffsdauer erreicht werden kann, da die Differenzgeschwindigkeit durch den Eingriff dann geringer ausfällt. Mit der Dauer von 1,3 s endet der automatisierte Eingriff vor der Beendigung des Beurteilungszeitraums. Der noch verbleibende Zeitraum kann für die Bewertung von Reaktionen der Probanden nach einem Systemeingriff herangezogen werden. Bild 6-7 zeigt den Verlauf der Geschwindigkeit und der Verzögerung bei der Auslösung einer automatisierten Teilverzögerung.

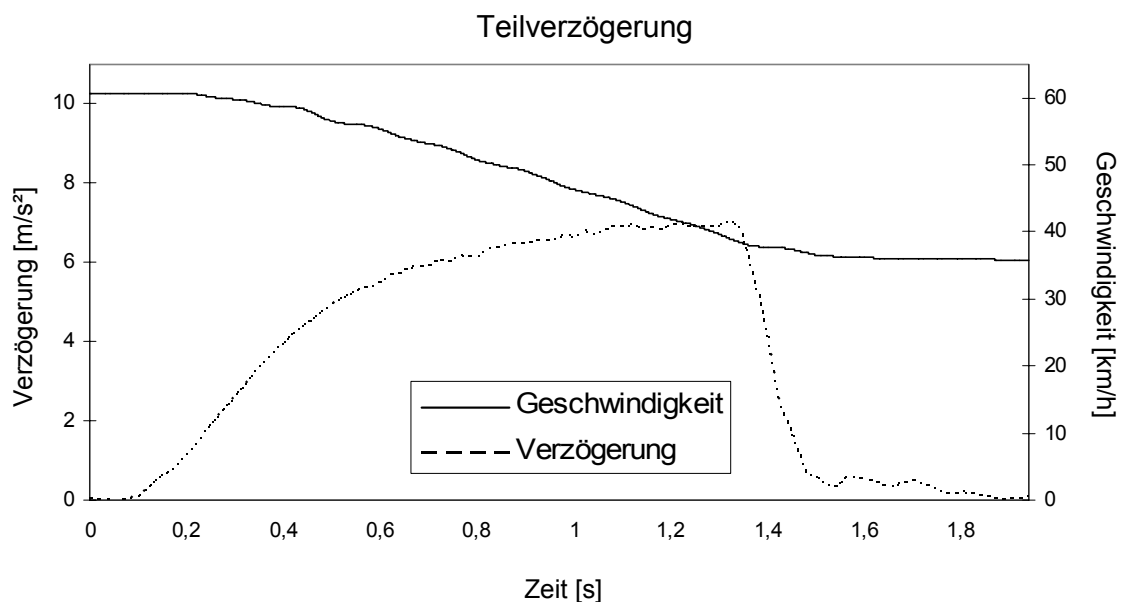


Bild 6-7: Geschwindigkeits- und Verzögerungsverlauf Teilverzögerung

⁹⁹ Lerner, R.: Warnmanagement im PKW, 2007

Während der Zeit von 1,3 s wird eine Verzögerung aufgebaut. Dabei wird nach einem Einschwingvorgang von 0,6 s eine Verzögerung von 6 m/s^2 erzielt. Diese angestrebte konstante Verzögerung steigt in der realen Ausführung in den folgenden 0,8 s noch leicht bis 7 m/s^2 an. Die durch die Teilverzögerung erzielte Geschwindigkeitsdifferenz beträgt $24,7 \text{ km/h}$.

6.3.5 Vollverzögerung

Bild 6-8 zeigt den Verlauf der Geschwindigkeit und der Verzögerung bei der Auslösung einer automatisierten Vollverzögerung.

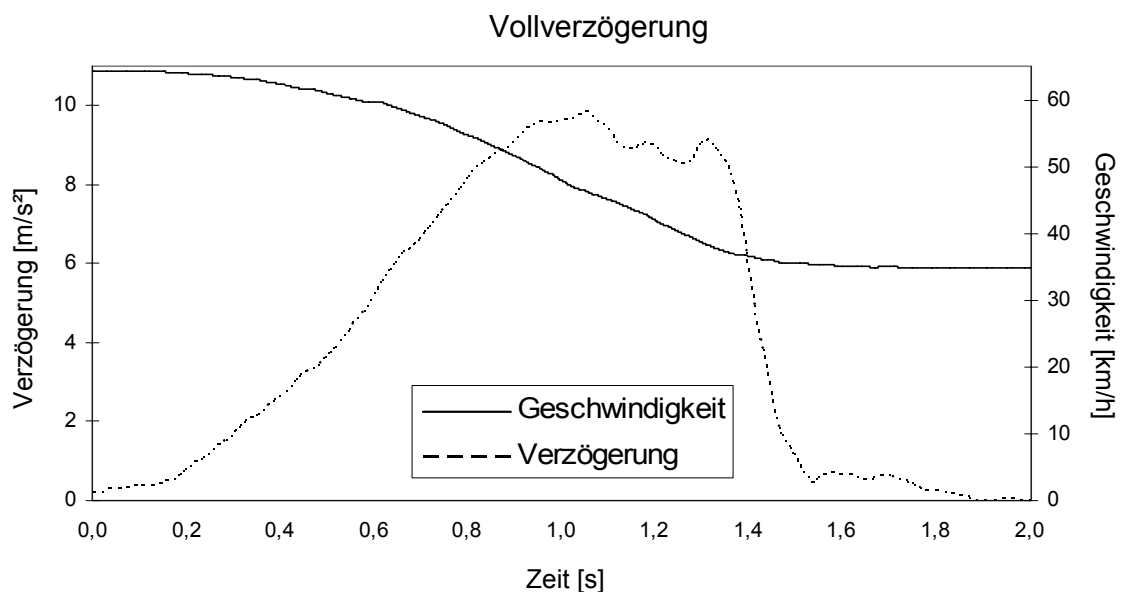


Bild 6-8: Geschwindigkeits- und Verzögerungsverlauf Vollverzögerung

Aus denselben Gründen wie bei der Teilverzögerung wird für eine Zeitdauer von 1,3 s eine Verzögerung aufgebaut. Nach einem Bremsdruckaufbau von 1 s wird eine Verzögerung von 10 m/s^2 erreicht. Diese angestrebte konstante Verzögerung kann in der realen Ausführung in den folgenden 0,3 s annähernd gehalten werden. Die durch die Vollverzögerung erzielte Geschwindigkeitsdifferenz beträgt $29,6 \text{ km/h}$.

Als Variante des Vollbremseingriffs von 1,3 s wird für Versuche mit Fehlauflösung eine Verzögerung bis in den Stand durchgeführt. Bild 6-9 zeigt den Verlauf der Geschwindigkeit und der Verzögerung bei der Auslösung einer automatisierten Vollverzögerung bis in den Stand.

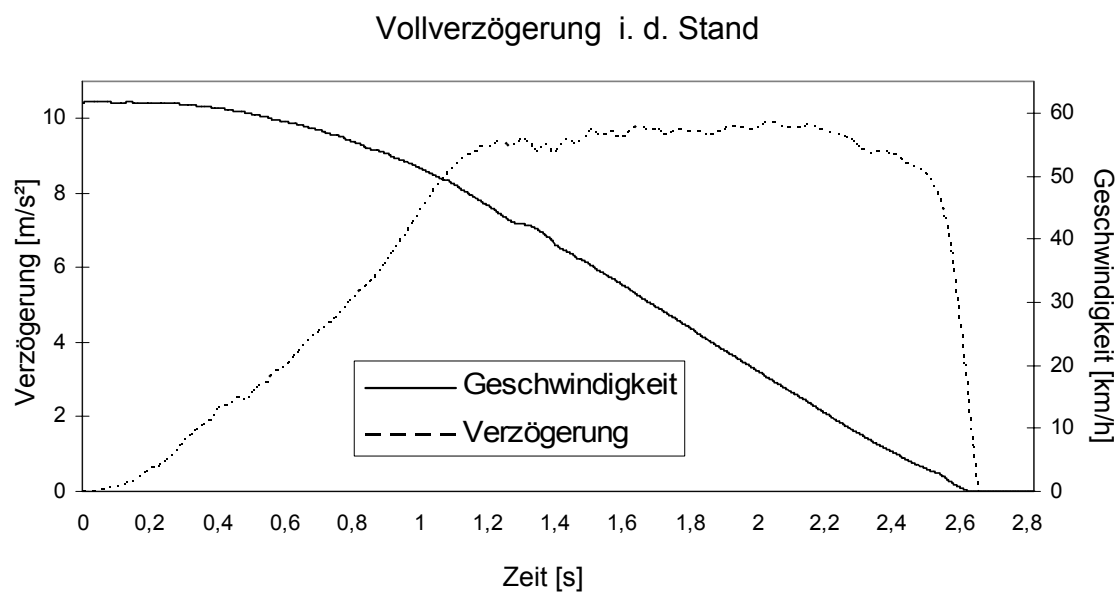


Bild 6-9: Geschwindigkeits- und Verzögerungsverlauf Vollverzögerung in den Stand

Diese Variante wird nur bei der Fehlauslösung angewendet. Die Vollverzögerung von konstant 10 m/s^2 wird nach dem Einschwingvorgang bis zum Stillstand des Fahrzeugs aufrechterhalten. Am Ende des Beurteilungszeitraums von 2 s wird eine Geschwindigkeitsdifferenz von $43,72 \text{ km/h}$ erreicht.

7 Probandenversuche

Die Inhalte des Kapitels 7 sind das Aufzeigen der Grundlagen für die durchgeführten Probandenversuche und die Beschreibung des Probandenkollektivs sowie des Versuchsablaufs.

7.1 Grundlagen für Probandenversuche

Grundsätzlich gilt: Je größer die Stichprobe, desto genauer sind die zu erwartenden Ergebnisse. Allerdings ist der Zuwachs an Genauigkeit nicht proportional zur Vergrößerung der Stichprobe. Da sich jedoch Kosten und Aufwand annähernd proportional zur Zahl der Versuchsteilnehmer entwickeln, muss bei jedem Experiment ein Kompromiss gefunden werden, der eine hinreichende Genauigkeit bei möglichst geringem Aufwand liefert. Klumpenstichproben sind zu vermeiden. Sind die das Versuchsergebnis beeinflussenden Eigenschaften N von 1 bis k bekannt, so bestimmt sich nach Formel 7.1 die mindestens benötigte Anzahl der Probanden:¹⁰⁰

$$N \geq \prod_{i=1}^k N_i \quad (7.1)$$

Die Anzahl der Ausprägungen mit ihren verschiedenen Eigenschaften werden miteinander multipliziert. Die sich daraus ergebende Mindestanzahl an Versuchspersonen ist im Normalfall mit einem Faktor zwischen drei und maximal zehn zu multiplizieren, um die möglichen Kombinationen der verschiedenen Merkmale mehrfach vertreten zu haben. Beim vorliegenden Untersuchungskonzept handelt es sich um das Nachstellen einer Verkehrssituation. Nach Fastenmeier¹⁰¹ haben allgemein folgende Merkmale maßgeblichen Einfluss auf die Art und Weise der Fahrzeugführung und die Reaktion auf Geschehnisse im Straßenverkehr: Alter, Dauer des Führerscheinbesitzes, Fahrpraxis, Nutzungsart des Fahrzeugs, Geschlecht, Intelligenz, Sehschärfe und Wahrnehmungsstile, dabei insbesondere Reaktionszeiten.

¹⁰⁰ Bubb, H.: Probandenanzahl in Fahrversuchen, 2003, S. 27

¹⁰¹ Fastenmeier, W.: Autofahrer und Verkehrssituation, 1995, S. 35 und S. 142

Von Fastenmeier wird diese Aufzählung insoweit vereinfacht, dass lediglich das Alter und der Grad der Fahrpraxis Einfluss auf das Fahrverhalten haben.¹⁰² Zur weiteren Vereinfachung kann das Probandenkollektiv so bestimmt werden, dass die Dauer des Führerscheinbesitzes und die Fahrpraxis mit dem Alter der Probanden korrelieren.¹⁰³ Mit der Variable Geschlecht ergibt sich in Tabelle 7-1 dargestellten Eigenschaften und die zugehörige Anzahl an Ausprägungen.

Tabelle 7-1: Festlegung relevanter Eigenschaften für das Fahrverhalten

Eigenschaft	Ausprägungen	Anzahl
Alter	jung mittel alt	3
Geschlecht	männlich weiblich	2

Für die Versuche der warnenden Frontalkollisionsgegenmaßnahmen *Seat Vibration & Symbol*, *Sound* und *Jerk* ist die Reaktionszeit des Fahrers die bestimmende Größe für die Wirksamkeit. Nach Tränkle nimmt bei Personen der Altersklasse über 50 Jahren die Abweichung der Reaktionszeiten vom Durchschnitt stark zu.¹⁰⁴ Deshalb wird auf die Gruppe der älteren Fahrer verzichtet, was die Anzahl der Altersausprägungen auf zwei reduziert. Ansonsten kann bei der Auswertung der Versuchsfahrten nicht geschlussfolgert werden, ob die Verteilung der Reaktionszeiten auf Eigenschaften der FKGM oder auf Eigenschaften des Alters zurückzuführen sind. Für Versuche mit den FKGM *Partial* und *Full* sind die Reaktionszeiten des Fahrers nicht derartig bestimmend für die Wirksamkeit wie bei den warnenden FKGM. Aus diesem Grunde wird die Gruppe der Älteren bewusst hinzugezogen, die Gruppe der routinierten Fahrer aber eingeschränkt. Mit obiger Formel 7.1 ergibt sich daraus mit dem Sicherheitsfaktor vier die Anzahl der Probanden pro FKGM zu:

$$N \geq \prod_{i=1}^k N_i = 2 \cdot 2 \cdot 4 = 16 \quad (7.2)$$

¹⁰² Fastenmeier, W.: Autofahrer und Verkehrssituation, 1995, S. 146

¹⁰³ Dies bestätigt sich für das verwendete Probandenkollektiv

¹⁰⁴ Tränkle, U.: Autofahren im Alter, 1994, S. 100 und S. 362

Dieser Wert liegt in einem Rahmen, der mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen bewältigt werden kann. Jedoch genügt diese Zahl nicht dem von Bubb deklarierten Minimalwert für eine hinreichend große Stichprobe von 30 Probanden.¹⁰⁵ Die sich daraus ergebenden Einschränkungen müssen zunächst jedoch hingenommen werden. Grundsätzlich sind Ergebnisse aus Untersuchungen mit einem relativ geringen Stichprobenumfang nicht als weniger aussagekräftig einzustufen als solche aus Untersuchungen mit einer größeren Probandenzahl. Werden die Ergebnisse bei der Auswertung richtig interpretiert und ist sich der Auswertende des begrenzten Stichprobenrahmens bewusst, so können durchaus auch aus Untersuchungen mit einer kleinen Stichprobe Informationen über die Gesamtheit gewonnen werden.¹⁰⁶

7.2 Probandenkollektiv

Auf Grundlage der kalkulierten Probandenanzahl wurde das Probandenkollektiv beider Versuchsreihen aus insgesamt 110 Probanden zusammengestellt. Für Versuche mit warnenden Frontalkollisionsgegenmaßnahmen ist eine Anzahl von mindestens 16 Probanden, für Versuche mit automatisierten Bremsengriffen und der *Baseline* von mindestens 20 Probanden vorgesehen.¹⁰⁷ Die Altersverteilung und die zugehörige Geschlechtsverteilung der Probanden ist in Bild 7-1 dargestellt.

¹⁰⁵ Bubb, H.: Probandenanzahl in Fahrversuchen, 2003, S. 29

¹⁰⁶ Buttler, F.: Statistik mit Stichproben, 2002, S. 33 ff

¹⁰⁷ Die Unterschiede resultieren aus Anforderungen von unterschiedlichen Industrieprojekten

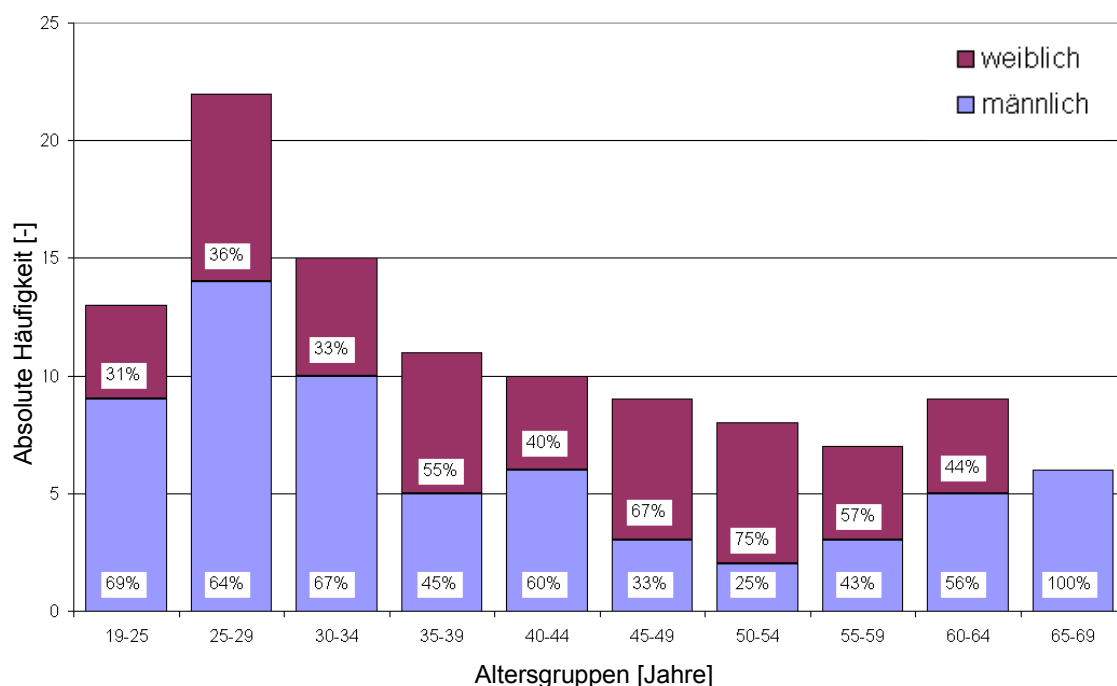


Bild 7-1: Alters- und Geschlechtsverteilung des Probandenkollektivs

Für die Übertragbarkeit der Ergebnisse ist eine homogene Geschlechts- und Altersverteilung aller Probanden eine generelle Anforderung. Diese konnte unter Berücksichtigung der in Kapitel 7.1 formulierten Einschränkungen annäherungsweise erfüllt werden. Ausnahmen bilden die höhere Gesamtanzahl von Probanden bei den unter 44-Jährigen sowie das Fehlen von weiblichen Probanden über 65 Jahren. Der jüngste Proband war 19 Jahre alt. Die absolute Geschlechterverteilung beträgt knapp 43 % weibliche Probanden und 57 % männliche Probanden. Da sowohl in den Versuchen der drei warnenden Frontalkollisionsgegenmaßnahmen *Seat Vibration & Symbol*, *Sound* und *Jerk* als auch in den Versuchen zur *Partial* bzw. *Full* die Altersgruppe der Jüngeren vertreten waren, erklärt sich die hohe absolute Häufigkeit bei den unter 35-Jährigen Probanden.

Bild 7-2 zeigt die Verteilung der Jahresfahrleistung der Probanden im Jahr vor Durchführung der Versuchsreihe und die dazugehörige Geschlechtsverteilung.

Knapp $\frac{3}{4}$ aller Probanden gaben eine Fahrleistung bis zu 20.000 km im Jahr an. Wie im Kapitel 7.1 angenommen, korrelieren die Eigenschaften Führerscheinbesitz und Fahrpraxis stark: Mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,98 ergibt sich nach Pearson ein hochsignifikanter Zusammenhang.¹⁰⁸ Es wurde auf eine gleichmäßige Verteilung des Probandenalters auf die zu untersuchenden Frontalkollisionsgegenmaßnahmen geachtet.

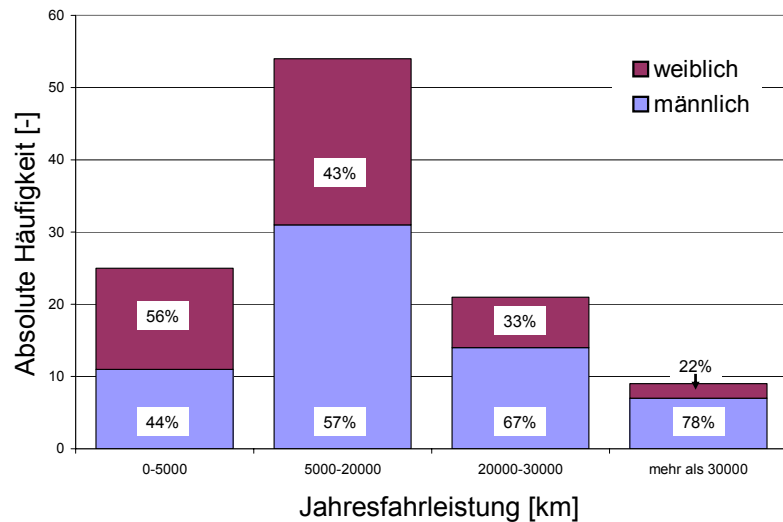


Bild 7-2: Jahresfahrleistung des Probandenkollektivs

7.3 Versuchsaufbau

In diesem Abschnitt werden aus Anforderungen an den Versuchsaufbau die gewählten Lösungen entwickelt und beschrieben. Das Versuchsdurchführungsschema sieht nach dem Empfang des Probanden die Beantwortung des ersten Fragebogens vor. Während der Durchführung jedes Versuchs mit Frontalkollisionsgegenmaßnahmen werden mit dem Messsystem fahrzeugbezogene Messdaten gewonnen. Im Anschluss an den entsprechenden Versuch wird der zweite Fragebogen beantwortet. Am Ende der Fahrversuche erfolgt die Probandenbefragung mit dem dritten Fragebogen.

Das generelle Ziel der Versuchsmethodik ist das Erzeugen einer Schrecksituation für den Probanden durch ein stark bremsendes vorausfahrendes Fahrzeug. Als Begründung für Auffahrunfälle wird in Kapitel 1.2 hauptsächlich Unaufmerksamkeit des Fahrzeugführers genannt, was zu der in Kapitel 4.2.4 beschriebenen Ablenkungsaufgabe führt. Diese führt zu einer Blickabwendung des Probanden, woraufhin die Bremsung des Dummy Target ausgelöst wird.

¹⁰⁸ Die getroffene Annahme zur Verringerung der Probandenanzahl ist damit gerechtfertigt

Ein Versuch ist dann als gültig deklariert, wenn der Proband erst nach dem Unterschreiten der Aktivierungsschwelle der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen seinen Blick auf die Straße richtet.¹⁰⁹

Als „unterstützend wirkend“ werden FKGM deklariert, wenn eine Blickzuwendung maximal 0,3 s vor der Auslösung erfolgt.¹¹⁰ Innerhalb dieser 0,3 s erfolgt die Wahrnehmung der Situation (siehe Modell der menschlichen Informationsverarbeitung nach Johanssen im Kapitel 1.2). Gemäß der Erwartung unterstützen die Frontalkollisionsgegenmaßnahmen den Fahrer in diesem Fall bei der Ausführung der Handlung (Bremsen und/oder Lenken). Diese Annahme wird durch eine Frage im Probandenfragebogen direkt im Anschluss an den Versuch validiert. Die Bremsleuchten der Heckansicht leuchten beim Beginn der Abbremsung des Dummy Target für 0,1 s auf, damit im Kamerasystem der Beginn der Bremsung markiert ist. Danach sind die Bremsleuchten bis zum Erreichen einer TTC von 7 s ausgeschaltet. Dadurch wird eine höhere Anzahl an gültigen Versuchen erreicht, da Probanden trotz eines kurzen Kontrollblicks die drohende Kollision in der Regel nicht erkennen (siehe Erklärungsmodell von Krüger im Kapitel 4.2.4). Negative Effekte auf das Fahrerverhalten durch die gewählte Lösung sind während der Versuche nicht zu beobachten gewesen.

Zu minimieren ist bei den Versuchen eine Verfälschung der Ergebnisse durch Voreingenommenheit des Probanden. Gefordert ist, den wahren Versuchszweck vor Beginn der ersten Notbremsung zu verschleiern. Dies wurde durch ein zusätzliches Fahrerassistenzsystem mit der Vorgabe des korrekten Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug („Ampel“) und durch Fragen im Eingangsfragebogen zu Präferenzen der Probanden beim Navigieren zu unbekannten Orten erreicht. Nach dem ersten Notbremsversuch ist dem Probanden indessen der wahre Versuchszweck deutlich geworden, er gilt als voreingenommen. Durch mehrmaliges Abfahren der Versuchsstrecke ohne Versuchsauslösungen des Dummy Target (Leerfahrten) oder die Auslösung von Fehlalarmen bzw. Fehleingriffen kann die Erwartungshaltung des Probanden abgeschwächt werden. Unter Berücksichtigung dieses Effekts ist die vergleichende Auswertung mehrerer Versuchsfahrten einer Versuchsperson möglich und führt zu probandenbezogenen Urteilen. Die Unvoreingenommenheit, die ein Proband vor dem ersten Versuch hatte, kann aber nicht wieder hergestellt werden. Als geeignet können die anschließenden Versuchsfahrten zur Beurteilung von Fehlauflösungen durch den Probanden angesehen werden.

¹⁰⁹ In den PKW-Versuchen wird eine Gültigkeitsrate von 60 % erzielt (siehe Kapitel 8, Ergebnisse)

¹¹⁰ Bei vier der 110 Probanden wirken die Frontalkollisionsgegenmaßnahmen unterstützend (siehe Kapitel 8, Ergebnisse)

7.3.1 Anforderungen an die Festlegung der Versuchsparameter

Die Anforderungen an die Festlegung der Versuchsparameter wurden zu Beginn der Versuchsreihe ermittelt und in Vorversuchen überprüft. Alle Versuche wurden auf dem institutszugehörigen Testgelände in Griesheim (nahe Darmstadt) auf einem Flugplatz durchgeführt.

Fahrzeuggeschwindigkeit bei den Versuchen

Die Länge der Geraden auf dem Testgelände beträgt knapp 1,3 km. Der Versuchsplan sieht wegen der seitlichen Auslaufzonen die Erzeugung der kritisch erscheinenden Situation auf der Geraden vor. Die Anforderung an die Höhe der Ausgangsgeschwindigkeit sieht eine Phase zum Erzeugen einer stationären Folgefahrt, eine Variation des Ortes der Notbremsung sowie einen ausreichenden Auslauf bis zum Ende der Landebahn vor. Weiterhin soll die Geschwindigkeit so hoch sein, dass innerhalb des Beurteilungszeitraums kein Stillstand der Fahrzeuge erreicht wird (siehe Kapitel 4.4.2).

Abstand der Fahrzeuge

Der Abstand des Probandenfahrzeugs zur vorausfahrenden EVITA ergibt sich aus der Zeitlücke τ . Diese ist definiert als Abstand d der Fahrzeuge dividiert durch die gefahrene Geschwindigkeit v :

$$\tau = \frac{d}{v} \text{ [s]} \quad (7.3)$$

Anzustreben ist eine vom realen Straßenverkehr bekannte, jedoch nicht im Bereich eines Bußgeldes liegende Zeitlücke.

Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs

Die Forderung ist, eine über alle Versuche konstante Verzögerung des Dummy Target aufzustellen, um eine Vergleichbarkeit der Versuche untereinander sicherzustellen. Je höher die Verzögerung ist, desto kritischer wirkt die Situation und desto schneller wird die Aktivierungsschwelle von Gegenmaßnahmen erreicht. Die höhere Materialbeanspruchung von EVITA durch größere Verzögerungen des Dummy Target ist zu berücksichtigen.

Seitenversatz der Fahrzeuge

Der Seitenversatz der Fahrzeuge darf nicht größer sein als eine Fahrzeugbreite, um eine korrekte Detektion der Fahrzeuge durch die Umfeldsensoren sowohl von EVITA als auch vom Versuchsfahrzeug und damit eine korrekte Funktion des Gesamtsystems zu gewährleisten.

Eingewöhnung

Der Proband soll sich zu Beginn der Versuche an das Fahrzeug gewöhnen können.

Erste Notbremsung

Die erste Notbremsung soll in einem abgelenkten Moment durchgeführt werden, nachdem der Proband zuvor die Versuchsrunde, das Fahrzeug und die Nebenaufgabe kennen gelernt hat.

Weitere Notbremsungen

Weitere Notbremsungen nach der ersten Notbremsung sind vorzusehen, um eine probandenbezogene Bewertung weiterer Gegenmaßnahmen durch jeweils einen Probanden zu erzielen.

Fehlauslösung

Ebenso wie die erste Notbremsung soll die Fehlauslösung zu einem vom Probanden nicht vorhersehbaren Moment ausgelöst werden.

7.3.2 Versuchsparemeter Abstand, Geschwindigkeit und Verzögerung

Durch Simulationen in einem Matlab-Simulink-Modell und der Überprüfung der Parameter in den Vorversuchen wurden die im Folgenden beschriebenen Ausgangseinstellungen für die stationäre Folgefahrt für die Hauptversuche festgelegt.

Abstand Versuchsfahrzeug und Dummy Target: 20 bis 25 m

Die aus dem Abstand resultierende Zeitlücke während der Folgefahrt beträgt während der Versuche 1,2 bis 1,5 s. Diesen Abstand stellen Probanden selbstständig bei Fahrversuchen im kontrollierten Feld ein.¹¹¹ Weiterhin entspricht diese Zeitlücke den auf deutschen Autobahnen am häufigsten anzutreffenden Zeitlücken.¹¹² Die kritische Situation mit der Aktivierung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen wird nach ca. 1,5 s erreicht, wenn der Fahrer keine kollisionsvermeidende Reaktion zeigt.

Fahrgeschwindigkeit: 60 bis 65 km/h

Bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 60 bis 65 km/h beträgt die minimale Dauer, bis der Ort der frühesten Abbremsung des Dummy Target erreicht wird, 25 s. In Vorversuchen wurde ermittelt, dass in diesem Zeitraum eine stationäre Folgefahrt erreicht wird.

¹¹¹ Färber, B.: Bremsverhalten in Gefahrensituationen, 2007, S. 84

¹¹² Färber, B.: Fahrerverhalten bei ANB, 2005 nach Uebel, A.: Abstandsverhalten auf Autobahnen, 2003

Weiterhin ist die Geschwindigkeit hoch genug, sodass ein Stillstand des Fahrzeuges im Beurteilungszeitraum nicht erreicht wird (siehe Anforderung aus Kapitel 4.4.2).

Verzögerung EVITA: 7 m/s²

Die maximale Verzögerung des Dummy Target beim Bremsen beträgt 9 m/s² (siehe Tabelle 4-1). Mit einer Verzögerung von 7 m/s² wird ein Sicherheitsbereich gelassen, wodurch bei jedem Versuch eine stabile Abbremsung des Dummy Target zu erwarten ist. Bei höheren Verzögerungen als 7 m/s² kann nicht ausgeschlossen werden, dass das Dummy Target einen Schwimmwinkel aufbaut, der zu einem Zielverlust des Radarsensors und damit zu einem Versuchsabbruch führt. Bei der Bestimmung der Verzögerung des Dummy Target wurde die Erkenntnis gewonnen, dass die Verzögerung für Probandenversuche nur Mittel zum Zweck für das Erzeugen einer Schrecksituation und damit weitestgehend irrelevant ist. Liegt der Schwerpunkt der Untersuchung auf der Bewertung der Fahrerreaktionen und wird die im Kapitel 4.2.4 beschriebene Ablenkung des Probanden angewendet, so ist die bestimmende Variable für eine Erschreckung des Probanden der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug, genauer: die Größe der Heckansicht. Dieser Heckansicht wird vom Probanden im sensorischen Speicher des Gehirns eine Größe beim Ausgangsabstand von 20-25 m zugeordnet. Danach kann der Proband wegen der Ablenkung das weitere Geschehen nicht mehr kontrollieren. Alarmiert durch die Frontalkollisionsgegenmaßnahme, erkennt er eine deutlich vergrößerte Heckansicht (mit aufleuchtenden Bremsleuchten), was zur Wahrnehmung einer kritischen Situation führt. In den kurzen Zeiträumen des Blickes auf die Straße kann weder eine Differenzgeschwindigkeit noch eine Beschleunigung des vorausfahrenden Fahrzeugs bestimmt werden, was auch Krueger¹¹³ bestätigt. Auch Todosiev¹¹⁴ beschreibt Wahrnehmungsschwellen für Geschwindigkeitsdifferenzen und leitet daraus das „Action-Point-Model of the Driver Vehicle System“ ab. Demnach pendeln Fahrer in Fahrgelassen um einen Wunschabstand und Verhaltensänderungen (beschleunigen, verzögern) treten nur an den Punkten einer wahrgenommenen Geschwindigkeitsänderung zuzüglich Reaktionszeit auf. Im Umkehrschluss kann die Verzögerung des Dummy Target auch größer (durch technische Lösungen auch oberhalb von 10 m/s²) ausfallen, wenn dadurch der Anteil der gültigen Versuche steigt. Die Glaubwürdigkeit der Situation für den Probanden muss aber beachtet werden. Für die Bewertung des Gesamtsystems inklusive der Sensorleistung zur Bestimmung der Situation ist hingegen eine Verzögerung wie bei herkömmlichen Fahrzeugen notwendig.

¹¹³ Krueger, H.: Sehfunktion versus Sehleistung, 1999, S. 6

¹¹⁴ Leutzbach, W.: Wahrnehmungsbedingungen, 1988 nach Fecher, N.: Dissertation, 2005, S. 16

7.3.3 Seitenversatz und Eingewöhnung

Um den Seitenversatz der Fahrzeuge zu minimieren wurde auf dem FZD-Testgelände eine Pylonengasse aufgestellt, die einen 5 m breiten Fahrstreifen darstellt (siehe später Bild 7-4). Während des Durchfahrens der Gasse wird der Proband zum Durchführen der Nebenaufgabe veranlasst. Nur in diesem Bereich wird ein Bremsmanöver des Dummy Target ausgelöst, da genügend Platz für Ausweichmanöver vorhanden ist. Im weiteren Verlauf entsteht ein Rundkurs (siehe Bild 7-3), den der Proband schon zu Beginn der Versuche auf mehreren Einführungsrounden kennen lernt. Ziel der Einführungsrounden ist es, den Proband an das Fahrzeug und die Folgesituation zu gewöhnen, weshalb schon während der Einführungsfahrten EVITA vorweg fährt. Während der letzten Einführungsrounde vor der ersten Bremsituation wird dem Proband die Nebenaufgabe gestellt, damit er sich auch damit vertraut machen kann.

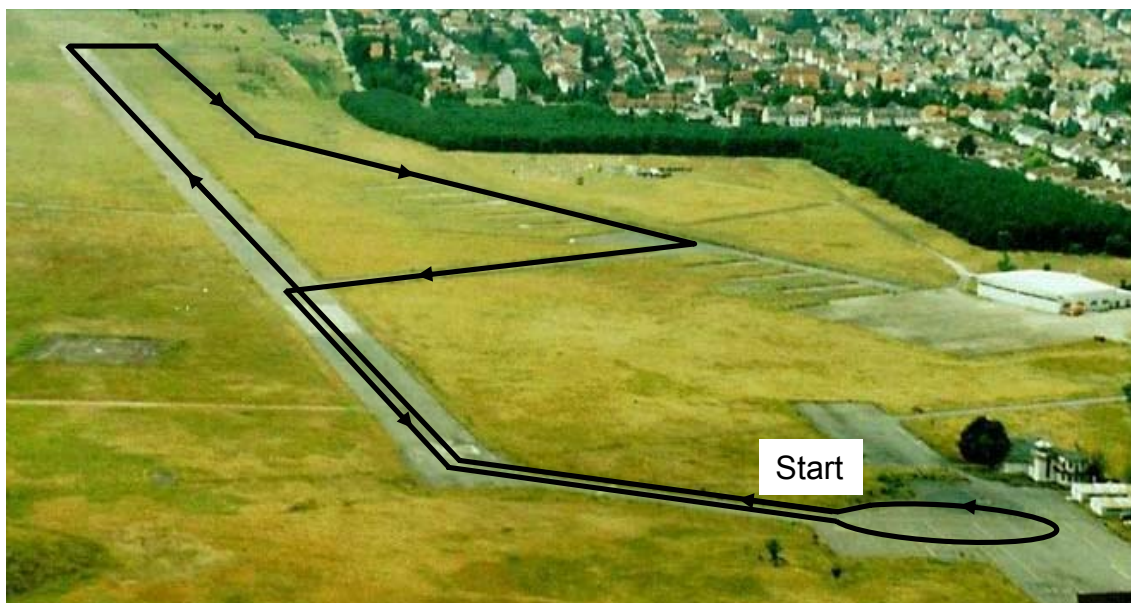


Bild 7-3: Versuchstrecke

Wie bereits gezeigt, ist für die Standardisierung des Verfahrens ein konstanter Ausgangsabstand vor der Abbremsung des Dummy Target erforderlich, um einen direkten Vergleich der Versuche zu gewährleisten. Dies wird durch das zusätzliche Fahrerassistenzsystem „Ampel“ im Kombi-Instrument erreicht. Die Ampel gibt im Abstandsreich zwischen 20 und 25 m ein grünes Licht aus, in den übrigen Abständen wird ein rotes Licht ausgegeben. Die Probanden werden aufgefordert, konstant im grünen Bereich der Ampel hinter dem vorausfahrenden Fahrzeug zu fahren. Unter anderem wird als Nebeneffekt erreicht, den realen Versuchszweck – das Erzeugen von Gefahrensituationen – zu verschleiern. Ist der Ausgangsabstand kurz vor dem geplanten Auslösen einer Notsituation nicht im geforderten Bereich, so wird kein Versuch durchgeführt.

7.3.4 Notbremsungen

Der Ort der ersten Notbremsung ist innerhalb der Pylonengasse auf einer Länge von etwa 600 m variabel. Der Beginn der Nebenaufgabe „Navigationsanweisungen vorlesen“ wird an den Probanden angepasst. Dadurch ist der Ort von weiteren Notbremsungen für den Probanden nicht vorhersehbar. Der Versuchsplan variiert Fahrten mit und ohne Nebenaufgabe und mit und ohne Notbremsung.

7.3.5 Fehlauslösung

Ebenso wie die Notbremsungen sind Ort und Zeitpunkt der Fehlauslösung für den Probanden nicht vorhersehbar. Zur Anwendung kamen zwei verschiedene Situationen. In der Versuchsreihe der warnenden Frontalkollisionsgegenmaßnahmen wird der Proband während der stationären Folgefahrt mit der Nebenaufgabe abgelenkt. Während dieser Blickabwendung wird die Gegenmaßnahme manuell ausgelöst. Bei der Versuchsreihe der automatischen Gefahrenbremsung (AGB) *Partial* und *Full* wird ein Hindernis aus Schaumstoff zu Beginn der Geraden vom Probanden in jeder Runde wie eine Schikane umfahren (siehe Bild 7-4). Das Hindernis aus Schaumstoff stellt ein halb auf dem Fahrstreifen parkendes Fahrzeug dar. Im Versuch mit Fehlauslösung wird kurz vor dem Hindernis eine automatisierte Bremsung durch den Versuchsleiter ausgelöst. Die Ausgangsgeschwindigkeit beträgt in beiden Versuchsreihen 60 km/h.



Bild 7-4: Versuchstrecke mit stehendem Hindernis für die Fehlauslösung bei AGB

8 Ergebnisse der Probandenversuche

In Kapitel 5 wurden die Untersuchungshypothesen aufgestellt. Im vorliegenden Kapitel 8 werden die Hypothesen mit den Ergebnissen der Probandenversuche verknüpft. Alle fahrzeugbezogenen Messwerte sind normalverteilt. Signifikanzen sind mit der Varianzanalyse bestimmt worden. Die Signifikanzniveaus sind 0,05 für signifikant, 0,01 für hochsignifikant und 0,001 für höchstsignifikant. Im Anhang befindet sich eine Tabelle mit Angaben zu allen Signifikanzen zwischen den untersuchten Frontalkollisionsgegenmaßnahmen.

8.1 Wirksamkeit

Hypothese 1 zielt auf das Ermitteln einer Reihenfolge der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen bzgl. deren Wirksamkeit.

Hypothese 1: Wirksamkeit
Es existiert eine Rangfolge bzgl. der Wirksamkeit der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen.

Die Wirksamkeit ist definiert als Geschwindigkeitsänderung Δv im Beurteilungszeitraum. Bild 8-1 zeigt die kumulierte Häufigkeit über der Wirksamkeit für alle Frontalkollisionsgegenmaßnahmen.

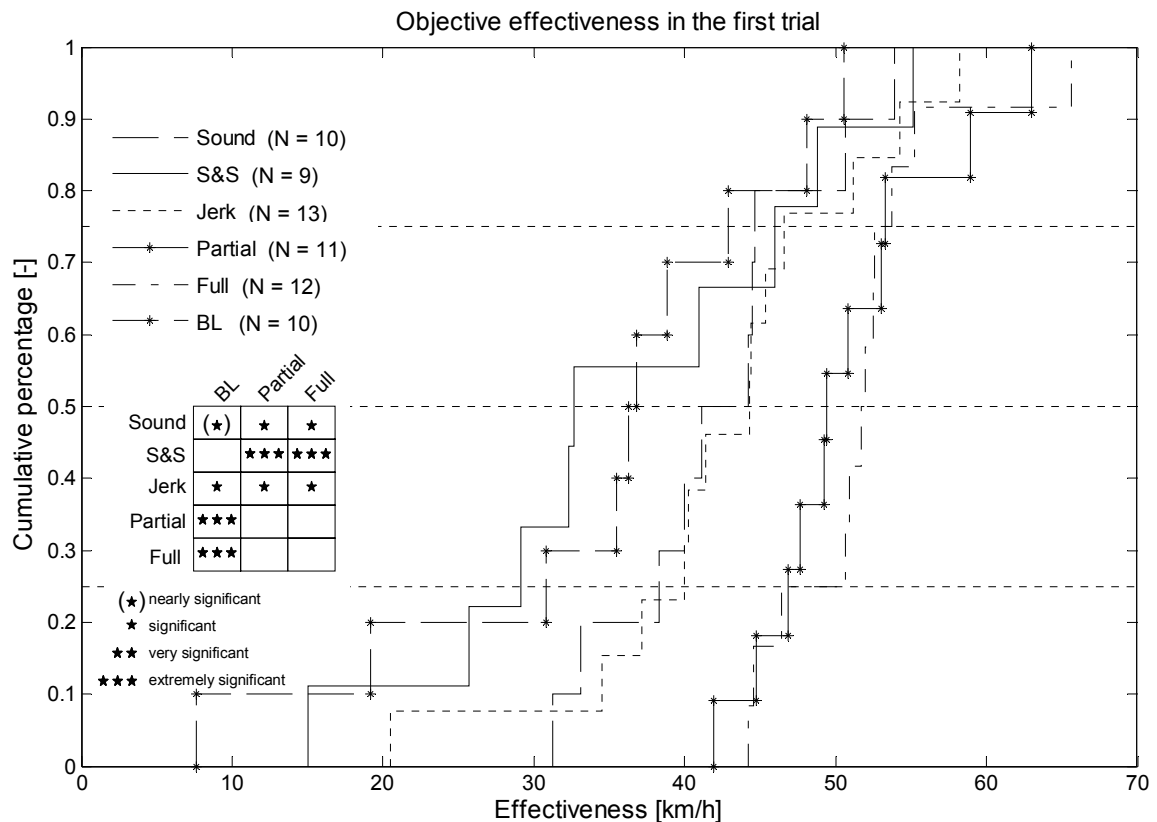


Bild 8-1: Fahrzeugbezogene Wirksamkeit aller Frontalkollisionsgegenmaßnahmen im ersten Versuch

Aufgetragen ist die kumulierte Häufigkeit (Cumulative percentage) gegenüber der Wirksamkeit (Effectiveness). Die Grenzen der mittleren 50 % sind als horizontale Hilfslinien angegeben und entsprechen den Grenzen eines Boxplots (Grenze bei 25 % und 75 %). Den Ergebnissen im Zwischenbereich wird ebenso wie bei einem Boxplot eine große Bedeutung zur Ermittlung der zentralen Aussagen beigemessen. Der Buchstabe N kennzeichnet die Anzahl der gültigen Versuche. Die Matrix beschreibt die Signifikanzen zwischen den Frontalkollisionsgegenmaßnahmen. Je weiter rechts eine Kurve liegt, desto wirksamer ist die Frontalkollisionsgegenmaßnahme.

Ersichtlich sind die Unterschiede zwischen den drei Gruppen „Seat Vibration & Symbol mit Baseline“ gegenüber „Jerk und Sound“ und gegenüber „Partial & Full“. Seat Vibration & Symbol weist aus statistischer Sicht keinen signifikanten Unterschied gegenüber einem Vergleichsversuch ohne Warnung auf (Baseline). Die Verläufe von Jerk und Sound ähneln sich. Die Hypothese der Gleichheit beider Verteilungen kann mit statistischen Methoden nicht widerlegt werden. Partial und Full erreichen die höchste Wirksamkeit mit der geringsten Streuung. Alle Probanden bei den AGB-Varianten bremsen selbstständig. Partial erzielt ohne Anteil des Fahrers eine Wirksamkeit von 24,7 km/h (siehe Kapitel 6.3.4), Full hingegen 29,6 km/h. Auffällig ist, dass Partial die Wirksamkeit von Full erreicht, was dem vergleichsweise langsamen Druckaufbau des automati-

schen Systems zugeordnet wird. Eine höhere Wirksamkeit des Vollbremseingriffs kann durch die Verwendung eines Bremssystems mit schnellerem Bremsdruckaufbau realisiert werden (siehe dazu Kapitel 6.3.5), wie es beispielsweise eine elektro-hydraulische Bremse (EHB) oder eine ESP-Pumpe mit mehreren Kolben¹¹⁵ zur Verfügung stellen.

Mit den Ergebnissen aus Bild 8-1 kann Hypothese 1 mit der Rangfolge und den Signifikanzen von Bild 8-2 beantwortet werden:

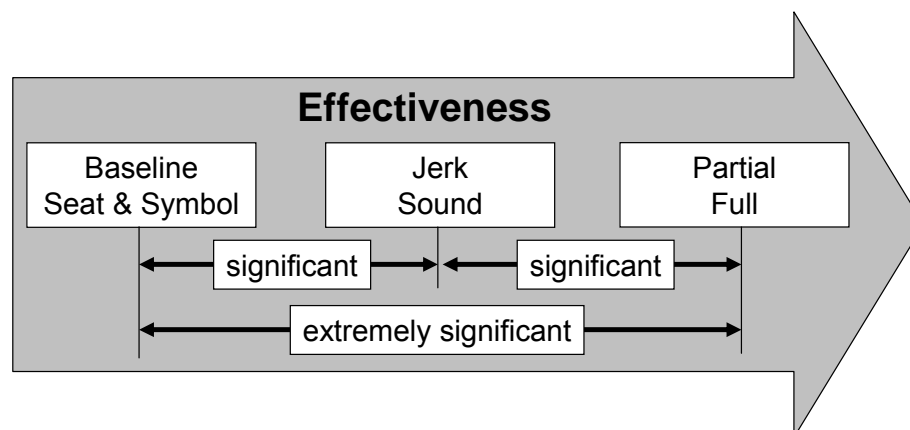


Bild 8-2: Rangfolge der fahrzeugbezogenen Wirksamkeit aller Frontalkollisionsgegenmaßnahmen

Hypothese 2 betrachtet die Probandeneinschätzung zur Wirksamkeit.

Hypothese 2: Probandenbezogene Wirksamkeit
Es existiert eine Rangfolge bzgl. der probandenbeurteilte Wirksamkeit der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen.

Zur Analyse der Hypothese wird eine Frage des Fragebogens am Ende aller Versuche herangezogen. Die Probanden wurden aufgefordert, die im zuvor stattgefundenen Versuch kennen gelernten Gegenmaßnahmen bzgl. der Wirksamkeit in eine Reihenfolge einzuteilen:

- C3: Bitte sortieren Sie die Warnungen nach ihrer Wirksamkeit, beginnend bei 1 für die Warnung, die am besten für eine Notsituation geeignet ist, bis 3 für die Warnung die am schlechtesten für eine Notsituation geeignet ist.

- ___ Sound
- ___ Sitzvibration mit Symbol
- ___ Bremsruck

¹¹⁵ Bekannt ist das Bosch ESP-Premium mit drei Kolben

Bestimmt wird die Präferenz jeder Gegenmaßnahme für den Platz Nr.1. Dazu wird zunächst (siehe Hypothesenbildung) ein Paarvergleich für die Frontalkollisionsgegenmaßnahmen erstellt. Das erstellte Bewertungskriterium „normierte probandenbeurteilte Wirksamkeit“ listet die Nennungen der Platzierungen im Paarvergleich als (+1) bzw. (-1) auf. (+1) kennzeichnet einen besseren Platz im Paarvergleich, (-1) eine schlechtere Bewertung. Mit der absoluten Anzahl der Nennungen wird daraus ein Mittelwert erstellt. Der Vergleich der Mittelwerte ermöglicht die Bildung einer Rangfolge. Der theoretisch mögliche Sonderfall, wie etwa $A > B > C > A$, trat nicht auf. Tabelle 8-1 zeigt die Vorschrift zum Bestimmen der probandenbeurteilten Wirksamkeit, Zahlenwerte befinden sich im Anhang.

Tabelle 8-1: Bestimmung der Rangfolge zur probandenbeurteilten Wirksamkeit

Normierte, relative Wirksamkeit	A zu B	B zu C	C zu A
-1 Anzahl	X	analog	analog
+1 Anzahl	Y		
Gesamt	X+Y		
Arithmetisches Mittel über Gesamt	$[X*(+1)+Y*(-1)]/(X+Y)$		

Da die Versuche in zwei voneinander getrennten Versuchsreihen durchgeführt wurden, sind die Aussagen der Versuchsreihe mit warnenden Frontalkollisionsgegenmaßnahmen nicht mit den Aussagen der Versuchsreihe zu automatisierten Bremsungen kombinierbar. Es erfolgt eine getrennte Betrachtung. Das Ergebnis für warnende Frontalkollisionsgegenmaßnahmen zeigt die probandenbeurteilte Rangfolge der Wirksamkeit:

Jerk > Sound > Seat Vibration & Symbol.

Der Vergleich mit der fahrzeugbezogenen Wirksamkeit zeigt eine gute Übereinstimmung. Als Ergebnis der Hypothese 1 liegen *Sound* und *Jerk* nahe zusammen, *Seat Vibration & Symbol* ist deutlich schlechter. Folglich stimmt die probandenbeurteilte Rangfolge mit der fahrzeugbezogenen Rangfolge tendenziell überein. Im Anhang befindet sich eine Tabelle mit den Zahlen zur Ermittlung der Rangfolge bei der probandenbeurteilten Wirksamkeit.

Für die Varianten der automatischen Gefahrenbremsung (AGB) ergibt sich die probandenbeurteilte Rangfolge der Wirksamkeit:

Partial > Full.

Der Vergleich der probandenbeurteilten Wirksamkeit mit der fahrzeugbezogenen Wirksamkeit bei den AGB-Versuchen zeigt, dass beide Bremseingriffe nahezu gleich sind, *Partial* aber von den Probanden als wirksamer beurteilt wird.

Zusammenfassung:

In der fahrzeugbezogenen Wirksamkeit der Hypothese 1 konnten Gruppen von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen mit signifikanten bzw. hochsignifikanten Unterschieden zueinander ermittelt werden. Überraschend ist die hohe Wirksamkeit der Frontalkollisionsgegenmaßnahme *Sound*: Ohne Eingriff in die Bremsung wird eine teilweise dem *Jerk* überlegene Wirksamkeit erreicht. Auffallend ist ebenso die Wirksamkeit von *Partial* auf dem Niveau von *Full*. Eine probandenbezogene Rangfolge der Wirksamkeit kann mit Hypothese 2 für die Versuchsreihe der warnenden Frontalkollisionsgegenmaßnahmen und für die automatisierten Bremsungen ermittelt werden.

8.2 Störungsmaß

Die Auswirkungen einer nicht-berechtigten Auslösung werden mit der Hypothese 2 bewertet. Das Störungsmaß ist definiert als Geschwindigkeitsreduktion im Versuch mit einer Fehlauslösung der Gegenmaßnahme (ohne Kollisionsgefahr) und ist invers zur Wirksamkeit.

Hypothese 3: Störungsmaß
Es existiert eine Rangfolge bzgl. des Störungsmaßes der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen.

Bild 8-3 zeigt das Störungsmaß der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen im Versuch mit Fehlauslösung.

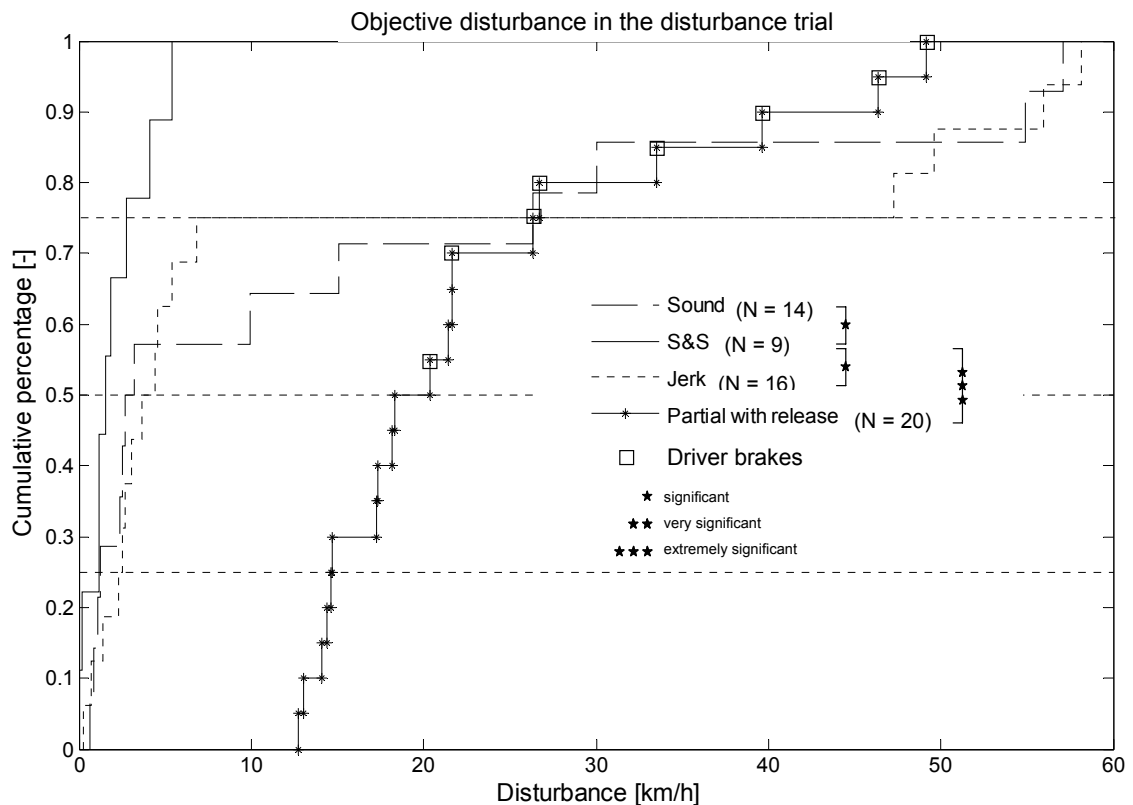


Bild 8-3: Störungsmaß der Warnelemente im Fehlauslösungsversuch

Wie in Kapitel 7.3.5 beschrieben, finden die Versuche zu den drei warnenden Frontalkollisionsgegenmaßnahmen *Sound*, *Seat Vibration & Symbol* und *Jerk* im neunten Versuch mit einer Ablenkung des Probanden statt. Je weiter links eine Kurve liegt, desto verzeihlicher ist die Frontalkollisionsgegenmaßnahme. Das Diagramm zeigt das geringe Störungsmaß von *Seat Vibration & Symbol*. Die maximale Geschwindigkeitsreduktion liegt lediglich bei knapp 6 km/h. Bei den Versuchen mit *Jerk* und *Sound* liegen 70 % der Werte bei einer Geschwindigkeitsreduktion von unter 15 km/h. Eine derartige Geschwindigkeitsreduktion kann im realen Verkehr noch als unbedenklich für den Fahrer und sein Umfeld, speziell für folgende Fahrzeuge, gelten. Diese Annahme wird mit der Verzögerung eines ACC-Systems bei Fehlbremung begründet: Bei einer maximalen Verzögerung des ACC-Systems von 3 m/s^2 wird im Beurteilungszeitraum von 2 s eine Differenzgeschwindigkeit von $4,5 \text{ m/s}$ ($= 16,2 \text{ km/h}$) erzielt. Dabei wird ein linearer Bremskraftanstieg in der ersten Sekunde bis zum Endwert angesetzt, somit wirkt in dieser Zeit nur die Hälfte der maximalen Verzögerung. Wird dieser Anstieg vernachlässigt, so werden 6 m/s ($= 21,6 \text{ km/h}$) erzielt. Bei insgesamt sechs zuvor abgelenkten Probanden bei den Warnelementen *Sound* und *Jerk* existiert eine Geschwindigkeitsreduktion von über 45 km/h. Bei der Durchführung einer derartigen fehlausgelösten Verzögerung durch den Fahrer muss mit Folgesituationen (Auffahren eines nachfolgenden

Fahrzeugs) gerechnet werden. Die genauere Analyse der Daten legt die Vermutung nahe, dass das Verhalten der sechs Probanden als Anpassung an den Versuchsablauf mit dem Ziel, eine möglichst optimale, kollisionsvermeidende Reaktion zu erzeugen, zu deuten ist. Es konnte jedoch kein objektives Kriterium ermittelt werden, mit dem die Hypothese überprüft werden kann. Aus diesem Grunde stellt eine erneute Untersuchung zur Wirkung von Fehlauflösung der Gegenmaßnahmen, ohne vorhergehende Kenntnis der Gegenmaßnahme, Potential für weitere Probandenversuche dar. Wegen der von den Probanden eingeleiteten hohen Verzögerung ist der Unterschied zwischen *Seat Vibration & Symbol* und *Sound* bzw. *Jerk* signifikant. Die geringere Versuchsanzahl bei *Seat Vibration & Symbol* erklärt sich durch äußere Umstände (vorzeitiges Beenden der Versuchsreihe durch Probanden und technischen Defekt).

Die Analyse der Fußbewegungen des rechten Fußes ergab bei den Warnelementen *Sound* und *Jerk* keine Auffälligkeiten. Weder eine Erschreckung der Probanden und ein dadurch hervorgerufenen Treten des Gaspedals noch eine Fallbewegung des Gasfußes beim automatisierten Bremsen sind zu beobachten.

In Bild 8-3 ist zum leichteren Vergleich mit Bild 8-4 der Teilbremseingriff eingezeichnet. Der Teilbremseingriff mit Lösen (*Partial with Release*) ohne Anteil des Fahrers erzielt in den Versuchen einen Median der Geschwindigkeitsreduktion von 16 km/h. Die Versuche, bei denen der Fahrer selbst die Bremse betätigt hat, sind mit einer quadratischen Markierung versehen. Mit der obigen Argumentation der Geschwindigkeitsdifferenz bei ACC-Systemen kann der Median der Geschwindigkeitsreduktion beim Teilbremseingriff mit Lösen als unbedenklich gelten. Im Gegensatz zu den Versuchen mit *Jerk*, *Sound* und *Seat Vibration & Symbol* erfolgte bei den Versuchen mit den Bremsengriffen keine Ablenkung des Fahrers. Deshalb sind alle Versuche als gültig zu bezeichnen. Bild 8-6 zeigt das Störungsmaß der AGB-Varianten.

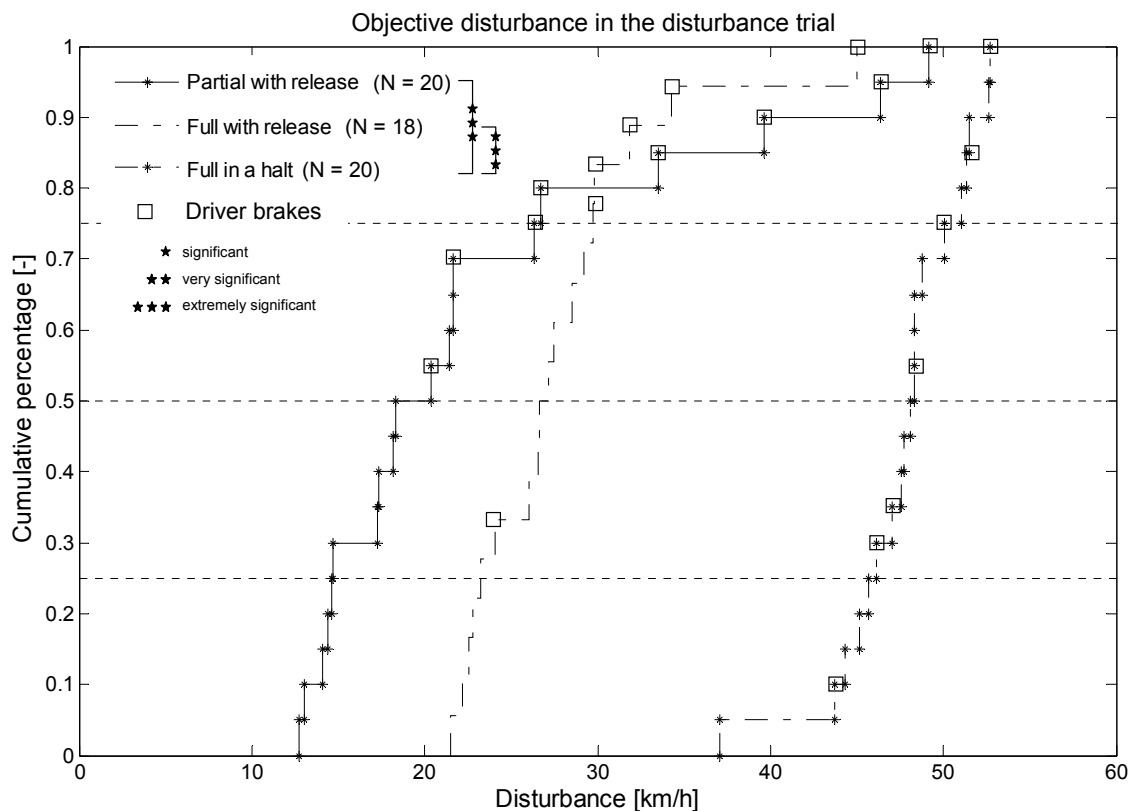


Bild 8-4: Störungsmaß der AGB-Varianten im Fehlauflösungsversuch

Der Median der Geschwindigkeitsreduktion der Vollverzögerung mit Lösen (*Full with Release*) ohne Fahreranteil beträgt 26,3 km/h, derjenige der Vollverzögerung ohne Lösen (*Full in a halt*) hingegen 48,1 km/h. Dieser Median stellt die zu erwartende Geschwindigkeitsreduktion dar. Im Verlauf der sich über mehrere Wochen erstreckenden Versuchsreihe ergibt sich eine Varianz, die durch Störeinflüsse wie Reifeneigenschaften, Witterung und Nässe erklärt werden.

Es zeigt sich ein höchstsignifikanter Unterschied der Vollverzögerung in den Stand (*Full in a halt*) gegenüber der Vollverzögerung mit Lösen und der Teilverzögerung mit Lösen. Im Unterschied zum Versuch mit berechtigter Auslösung (mit Kollisionsgefahr) verstärken bei der Teilverzögerung nur wenige Probanden die automatische Bremsung durch eine eigene Bremsung. Die meisten Probanden erkennen eine fehlerhafte Auslösung, wodurch das Störungsmaß eines Großteils der Teil- und Vollverzögerung mit Lösen nicht deutlich erhöht wird. Die Hypothese der Gleichheit dieser beiden Varianten kann statistisch nicht widerlegt werden. Bei einer Vollverzögerung ist das Störungsmaß, und somit die Gefährdung von nachfolgenden Fahrzeugen, hingegen erheblich.

Alle Fehlauflösungen gefährdeten nicht die Sicherheit des Fahrzeugführens, da alle Probanden das Fahrzeug ohne instabile Fahrzustände zu erzeugen, abgebremst haben.

Fehlauslösungen stellen somit in erster Linie ein Akzeptanzproblem dar, welches Färber und Maurer¹¹⁶ bereits bei der Untersuchung der wesentlichen drastischeren ANB festgestellt haben. Die Antwort auf die Frage nach Art der Überstimmung eines automatisierten Bremsengriffs durch den Fahrer ist ein Forschungsgebiet der Ergonomie, weshalb an dieser Stelle keine Vertiefung der Thematik erfolgt.

Bild 8-5 zeigt die Rangfolge des fahrzeugbezogenen Störungsmaßes aller Frontalkollisionsgegenmaßnahmen mit den Signifikanzen im Vergleich.

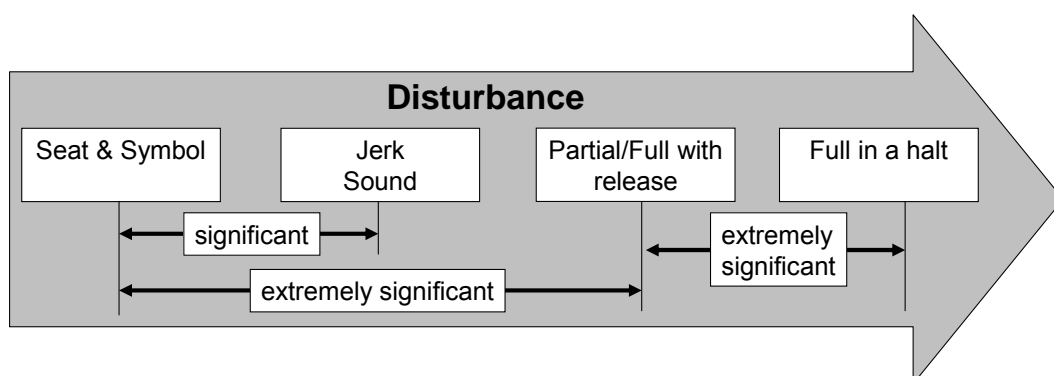


Bild 8-5: Rangfolge des fahrzeugbezogenen Störungsmaßes aller Frontalkollisionsgegenmaßnahmen

Neben dem fahrzeugbezogenen Störungsmaß wird die probandenbezogene Verzeihlichkeit bewertet.

Hypothese 4: Verzeihlichkeit

Es existiert eine Rangfolge bzgl. der Verzeihlichkeit der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen.

Die Fragestellung und deren Auswertung sind analog zur Fragestellung bei der probandenbezogenen Wirksamkeit:

- C5: Welche der Warnungen würde Sie bei einer Fehlauslösung am wenigsten stören? Bitte sortieren Sie die Warnungen von 1, für die Warnung die am wenigsten stört, bis 3, für die Warnung die am meisten stört.

- ___ Sound
- ___ Sitzvibration mit Symbol
- ___ Bremsruck

¹¹⁶ Färber, B.: Fahrerverhalten bei ANB, 2005

Das Ergebnis zeigt für die drei untersuchten Warnelemente folgende Rangfolge bzgl. der probandenbeurteilten Verzeihlichkeit:

Seat Vibration & Symbol > Sound > Jerk

Der Vergleich mit dem fahrzeugbezogenen Störungsmaß zeigt im Falle der drei warnenden Frontalkollisionsgegenmaßnahmen eine Bestätigung des am wenigsten störenden Warnelements *Seat Vibration & Symbol*. Die Unterschiede zwischen *Sound* und *Jerk* deuten objektiv eher auf eine größere Verzeihlichkeit von *Jerk* hin, jedoch ohne signifikante Absicherung. Im Anhang befindet sich eine Tabelle mit den Zahlen zur Ermittlung der Rangfolge bei der Verzeihlichkeit.

Für die AGB-Varianten ergibt sich die probandenbeurteilte Rangfolge der Verzeihlichkeit:

Partial with Release > Full with Release > Full in a halt

Bei der probandenbeurteilten Verzeihlichkeit der AGB-Varianten wird die gleiche Rangfolge wie beim fahrzeugbezogenen Störungsmaß ermittelt.

Zusammenfassung:

Zur Hypothese 3 des Störungsmaßes können Gruppen von FKGM mit signifikanten Unterschieden ermittelt werden. *Seat Vibration & Symbol* ist signifikant bis höchstsignifikant verzeihlicher als alle anderen untersuchten Frontalkollisionsgegenmaßnahmen. *Sound* und *Jerk* sind signifikant bis hochsignifikant verzeihlicher als alle AGB-Varianten. *Full in a halt* weist das größte Störungsmaß auf. Die probandenbeurteilte Verzeihlichkeit stimmt nahezu vollständig mit der fahrzeugbezogenen Verzeihlichkeit überein.

8.3 Reaktionszeiten

In Kapitel 4.4.2 wurde der zeitliche Verlauf eines Versuchs mit den zugehörigen Bewertungskriterien erläutert. Die Blickzuwendungszeit startet bei der Aktivierung der Gegenmaßnahme und endet beim Blick auf die Straße. Die Umsetzzeit beginnt mit der Fußbewegung vom Gaspedal und endet beim ersten Kontakt mit dem Bremspedal. Mit dem ersten Kontakt des Bremspedals startet die Betätigungszeit, welche bei einem Hauptbremszylinderdruck von 60 bar (dies entspricht einer Fahrzeugverzögerung von 10 m/s²) aufhört. Die Gesamtreaktionszeit setzt bei der Aktivierung der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen ein und endet mit Abschluss der Gesamtreaktionszeit. Ziel der Hypothesen aus Kapitel 5.3 ist es, eine Differenzierung der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen zu erreichen.

Hypothese 5: Blickzuwendungszeit, Umsetzzeit und Betätigungszeit

Es existiert eine Rangfolge der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen bzgl. der Blickzuwendungszeit, der Umsetzzeit, der Betätigungszeit und der Gesamtreaktionszeit.

Baseline-Versuche können bei der Bestimmung der Blickzuwendungszeit nicht einbezogen werden, da es im Gegensatz zu Versuchen mit Frontalkollisionsgegenmaßnahmen kein externes Signal gibt, woraufhin der Proband den Blick nach vorne richtet. Vielmehr handelt es sich bei der Blickzuwendung in der *Baseline* um willkürliche, stochastische Vorgänge. Mit der Erklärung von Krüger in Kapitel 4.2.4 kann interpretiert werden, dass Probanden ihr mentales Modell der Situation mit einem Kontrollblick absichern wollen. Bild 8-6 zeigt die Blickzuwendungszeit im ersten Versuch.

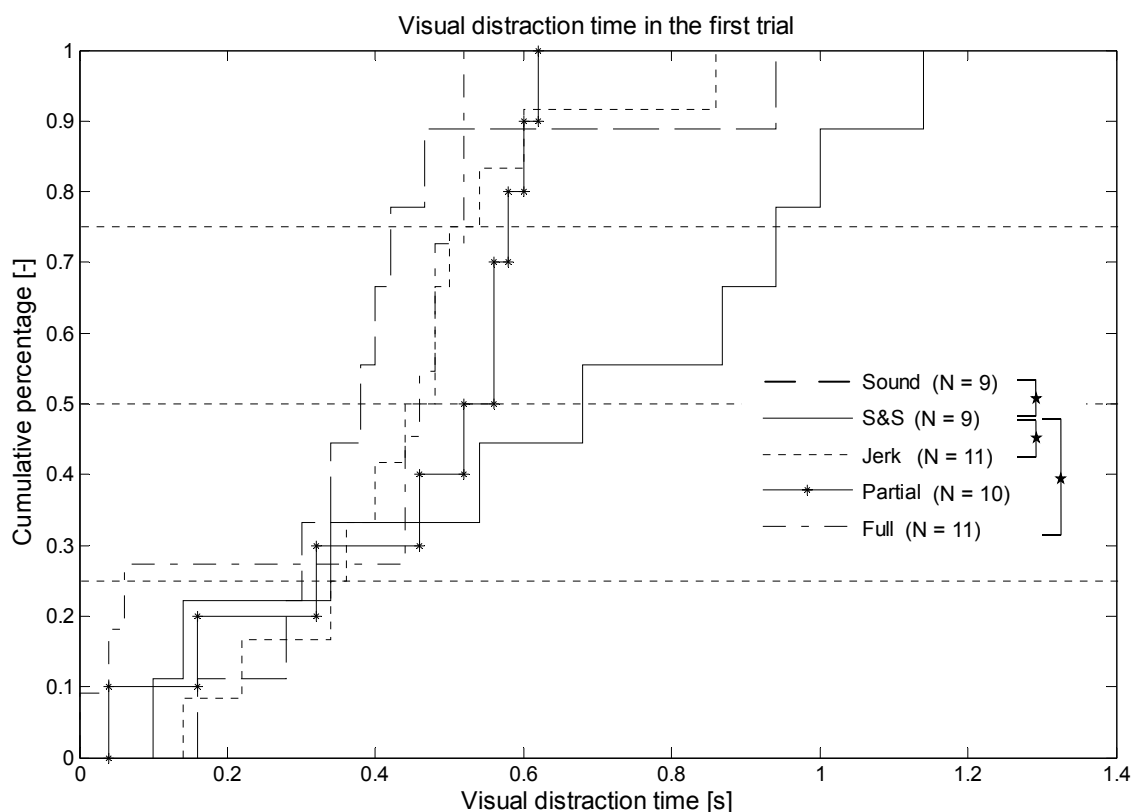


Bild 8-6: Blickzuwendungszeit im ersten Versuch

Je weiter links eine Kurve liegt, desto kürzer ist die Blickzuwendungszeit. Auffällig sind die große Streuung von *Seat Vibration & Symbol* und die im Vergleich dazu geringe Streuung der übrigen Frontalkollisionsgegenmaßnahmen. Die Blickzuwendungszeit bei *Seat Vibration & Symbol* dauert teilweise doppelt so lange wie bei den schnellsten Frontalkollisionsgegenmaßnahmen. Es ergibt sich ein signifikanter Unterschied der Blickzuwendungszeit für *Full*, *Sound* und *Jerk* gegenüber dem Warnelement *Seat Vibra-*

tion & Symbol. Mit Ausnahme von *Seat Vibration & Symbol* liegen alle Kurvenverläufe der Gegenmaßnahmen im wichtigen Bereich bis 75 % sehr eng zusammen.

Wie bereits gezeigt wurde, werden mit dem angewendeten Verfahren mit EVITA erstmals extrem kritisch erscheinende Unfallsituationen dargestellt. In diesem Sinne kann den ermittelten Reaktionszeiten eine große Bedeutung, besonders im Vergleich mit bekannten Werten der Literatur, beigemessen werden. Burckhardt¹¹⁷ hat bereits 1985 ausführliche Untersuchungen zu Reaktionszeiten von Kraftfahrzeugführern veröffentlicht. Bei seinen Versuchen folgte ein Proband einem vorausfahrenden Fahrzeug im öffentlichen Straßenverkehr.

Die Fahrzeuge waren über Funk miteinander verbunden. Sobald die Bremsleuchten des vorausfahrenden Fahrzeugs aufleuchteten, war der Proband zu einer schnellstmöglichen Reaktion aufgefordert. Bei der dargestellten Situation handelt es sich nicht um eine derartig erschreckende Notbremssituation wie in der vorliegenden Studie. Dieser Nachteil sollte bei den Untersuchungen von Burckhardt durch die Aufforderung an den Probanden zur schnellen Reaktion kompensiert werden. Burckhardt setzte Probanden im Alter von 18 bis 58 Jahren ein. Die von Burckhardt ermittelten Werte haben bei der Verkehrsrechtssprechung Gültigkeit.¹¹⁸

Die Blickzuwendungszeit liegt nach Burckhardt für Blickbewegungen, die größer als 5° sind, zwischen 0,41 s (2 % aller Werte) bis 0,68 s (98 % aller Werte), der Median bei 0,61 s. Bedingt durch die gezielte Ablenkung der Probanden mit einer Kopfdrehung, die größer als 5° ist, fallen die gemessenen Blickzuwendungszeiten in der EVITA-Versuchsreihe zum Teil länger aus.

¹¹⁷ Burckhardt, M.: Reaktionszeiten bei Notbremsvorgängen, 1985

¹¹⁸ Dies ist gültig seit Beendigung der „Kommission zur Erarbeitung von Empfehlungen für die Organe der Verkehrsrechtspflege bzgl. der für die Reaktionszeit anzunehmenden Grenzen“ und der Annahme der Werte auf dem 20. Deutschen Verkehrsgerichtstag im Jahr 1982 in Goslar

Im Reaktionsprozess des Probanden folgt nach der Blickzuwendungszeit die Umsetzzeit. Bild 8-7 stellt die Umsetzzeit aller Gegenmaßnahmen zusammengefasst dar. Die Unterschiede der Umsetzzeit zwischen den einzelnen Gegenmaßnahmen sind äußerst gering. Es lassen sich keine Signifikanzen auf einem Niveau von 5 % nachweisen, womit keine Rangfolge ermittelt werden kann. Das höchste Signifikanzniveau wird mit 19 % bei *Baseline* vs. *Jerk* erreicht, wobei *Baseline* die kürzere Umsetzzeit hat.

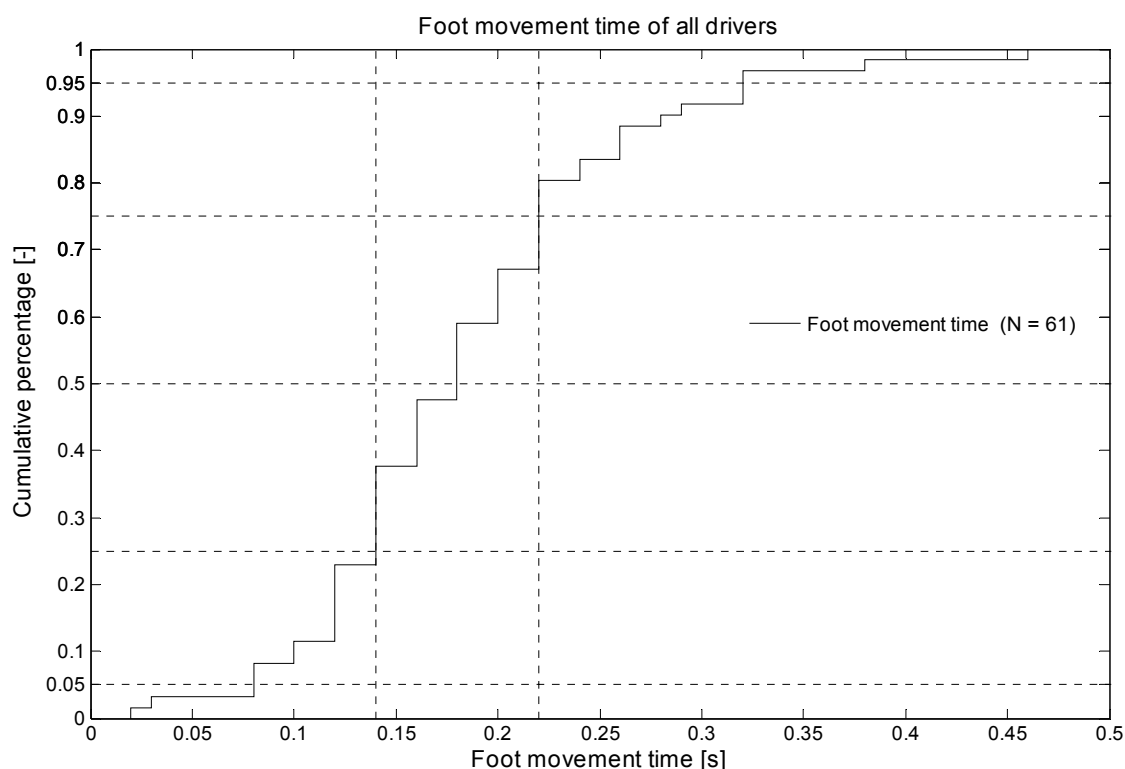


Bild 8-7: Zusammengefasste Umsetzzeit aller Gegenmaßnahmen im ersten Versuch

Zusammengefasst abgebildet sind alle gültigen ersten Versuche. Die Werte liegen zwischen 0,08 s (5 % aller Werte) und 0,33 s (95 % aller Werte), der Median bei 0,175 s. Der Vergleich der Umsetzzeit mit vorhandener Literatur ergibt eine gute Übereinstimmung der Werte. Die Umsetzzeit nach Burckhardt beträgt 0,15 s (2 % aller Werte) bis 0,21 s (98 % aller Werte) mit einem Median von 0,19 s.¹¹⁹ Nach einer neueren Untersuchung von Färber liegt die Umsetzzeit zwischen 0,129 s (5% aller Werte) und 0,248 s (95 % aller Werte), der Median bei 0,182 s.¹²⁰ Die Umsetzzeit nach Weiße beträgt für Notbremsungen minimal 0,04 s, maximal 2,00 s, der Mittelwert liegt bei 0,19s.¹²¹

¹¹⁹ Burckhardt, M.: Reaktionszeiten bei Notbremsvorgängen, 1985

¹²⁰ Färber, B.: Bremsverhalten in Gefahrensituationen, 2007, S. 82

¹²¹ Weiße, J.: Bremsassistent, 2003, S. 114

Die Verteilung der Umsetzzeit wurde auf Alterseffekte untersucht. Bild 8-8 zeigt die Umsetzzeit über dem Alter der Probanden im ersten Versuch. Die Trendgerade ist eingefügt.

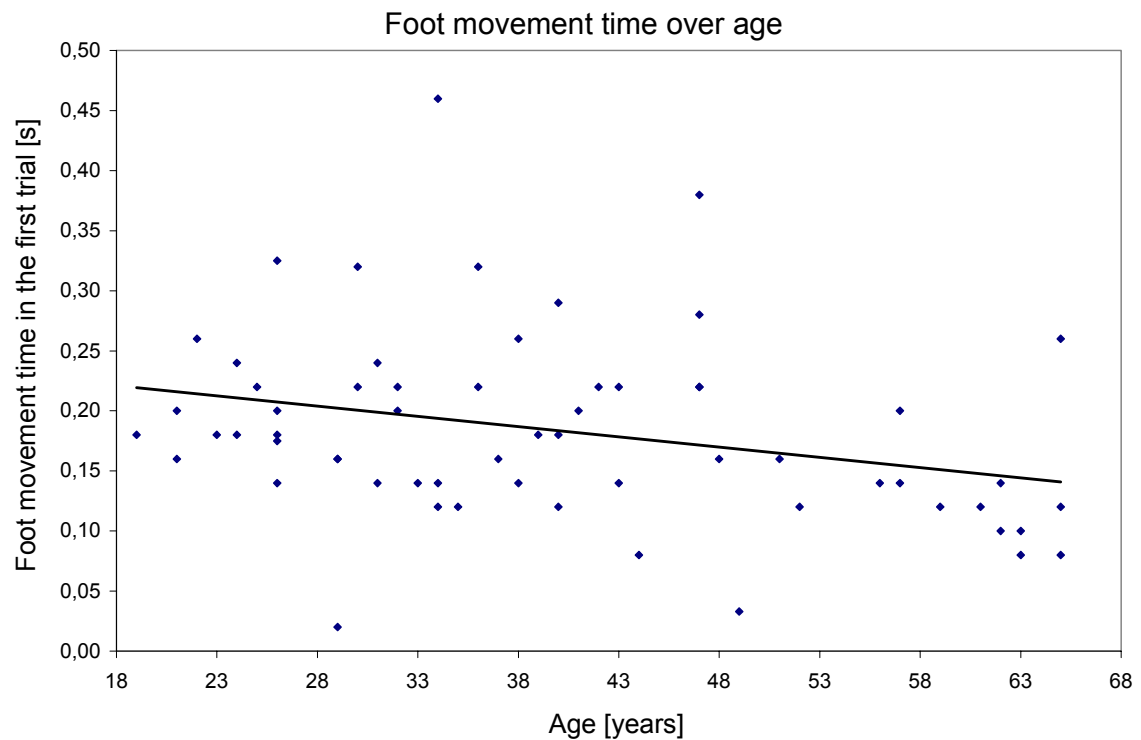


Bild 8-8: Zusammengefasste Umsetzzeit über dem Alter im ersten Versuch (N=61)

Mit leichter Tendenz ergibt sich, dass ältere Probanden eine kürzere Umsetzzeit haben als jüngere Fahrer. Nach Pearson ergibt sich ein signifikanter Zusammenhang mit einem Korrelationskoeffizienten von $-0,291$.¹²² Damit ist gezeigt, dass beim untersuchten Probandenkollektiv die Umsetzzeit mit steigendem Alter kürzer wird. Möglicherweise sind ältere Fahrer bedingt durch ihre längere Fahrerfahrung trainierter als jüngere Fahrer.

¹²² Signifikanz von 0,023

Nach der Umsetzzeit beginnt die in Bild 8-9 aufgelistete Betätigungszeit der Gegenmaßnahmen.

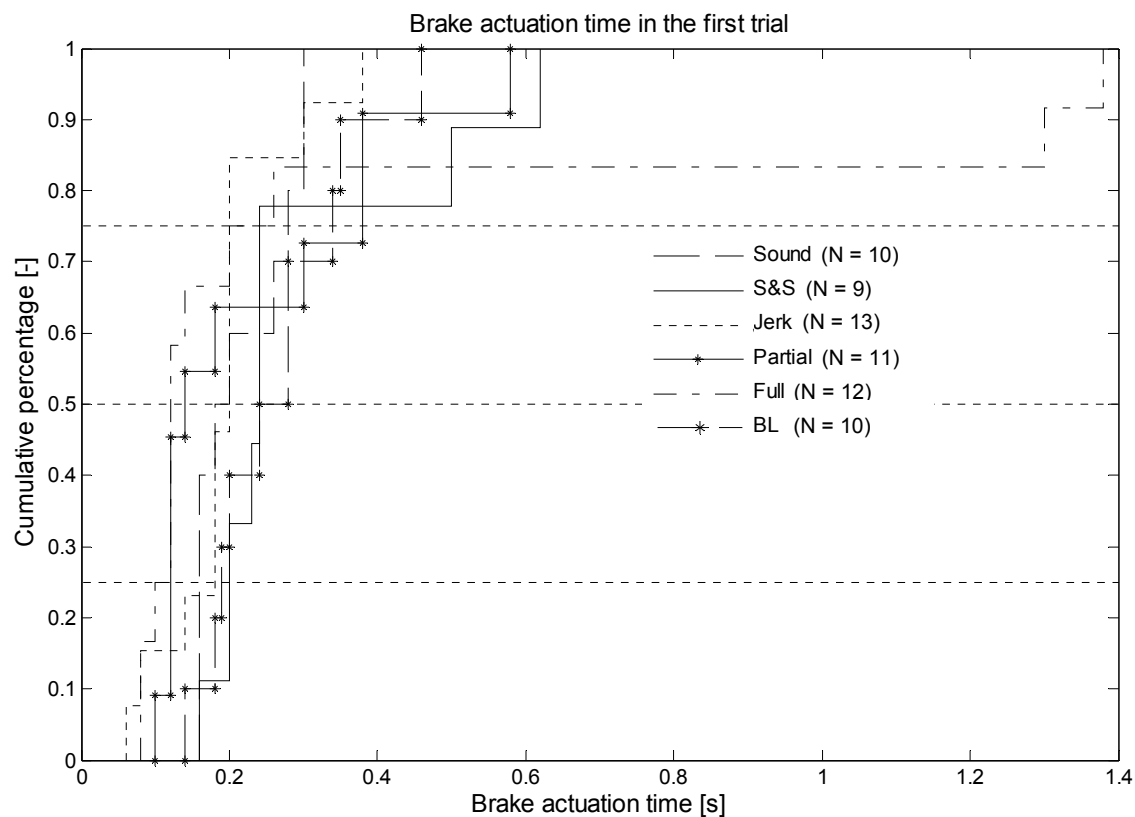


Bild 8-9: Betätigungszeit der einzelnen Gegenmaßnahmen im ersten Versuch

Die Betätigungszeiten der verschiedenen Gegenmaßnahmen liegen eng zusammen: Bei jeder Gegenmaßnahme erreichen 75 % aller Probanden eine Betätigungszeit von weniger als 0,4 s. Zwei Versuchspersonen betätigen erst nach der Beendigung eines Vollbremseingriffs die Bremse mit mehr als 60 bar, nachdem sie zuvor während des Eingriffs nur einen geringen Bremspedaldruck erzeugt haben. Bei den kürzesten Betätigungszeiten von 0,1 bis 0,2 s werden Bremskraftanstiegszeiten im Hauptbremszylinder (HBZ) von 300 bis 600 bar/s erzielt. Die realisierte Lösung für den Vollbremseingriff mit der ESP-Pumpe schafft mit 60 bar/s eine Größenordnung weniger. Bedingt durch diesen relativ langsamen automatischen Bremsdruckaufbau können die geringen Unterschiede in der Wirksamkeit von *Partial* und *Full* erklärt werden, da Probanden bis zu zehnmal größere Druckaufbaugradienten erzielen. Im Vergleich mit Burckhardt ist die Umsetzzeit als Ansprechzeit + Schwellzeit definiert. Die zugehörigen Werte liegen zwischen 0,17 s (2 % aller Werte) und 0,24 s (98 % aller Werte), der Median bei 0,22 s. Die Betätigungszeiten der EVITA-Versuche weisen eine größere Streuung auf. Vereinzelte Werte größer als 0,3 s existieren bei allen Frontalkollisionsgegenmaßnahmen.

Alle Einzelzeiten zusammengefasst ergeben die in Bild 8-10 aufgelistete Gesamtreaktionszeit aller Gegenmaßnahmen im ersten Versuch.

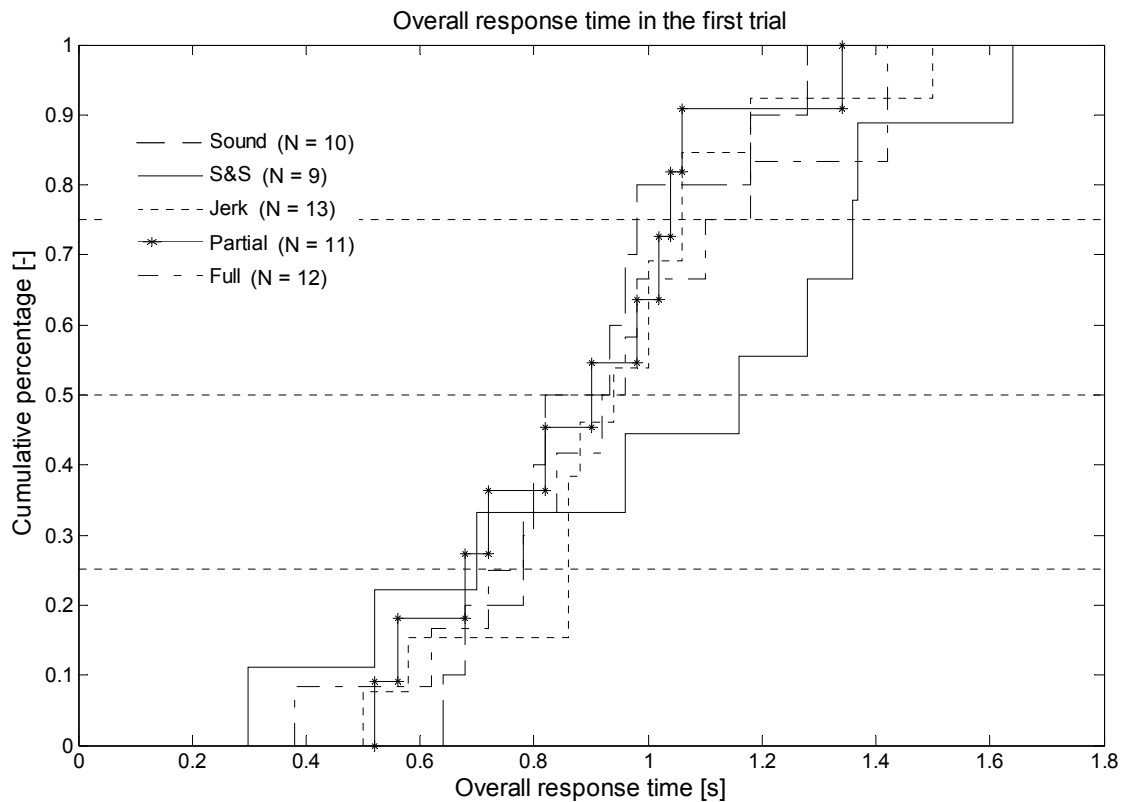


Bild 8-10: Gesamtreaktionszeit im ersten Versuch

Wiederholt liegen die Kurvenverläufe vieler Gegenmaßnahmen beieinander. *Baseline*-Versuche können mit der selben Begründung wie bei der Blickzuwendungszeit nicht mit in die Betrachtung aufgenommen werden. Wie bereits in der Blickzuwendungszeit deutlich wurde, ist auch die Gesamtreaktionszeit von *Seat Vibration & Symbol* qualitativ länger als die der verglichenen Gegenmaßnahmen. Es ergeben sich jedoch keine statistisch nachweisbaren signifikanten Unterschiede. Im Vergleich mit Bild 8-6 wird deutlich, dass die Blickzuwendungszeit von *Seat Vibration & Symbol* eine vergleichbare Dauer hat wie die Gesamtreaktionszeit der übrigen Gegenmaßnahmen: Während bei den letztgenannten FKGM bereits eine Fahrzeugvollverzögerung anliegt, wird bei *Seat Vibration & Symbol* gerade die Möglichkeit zum Erkennen der kritischen Situation gegeben.

In Kapitel 6.3.5 wurde die Begründung für die Dauer eines automatisierten Bremseneingriffs von 1,3 s gegeben: In Vorversuchen haben alle Probanden innerhalb von 1,1 s Gesamtreaktionszeit selbstständig eine Vollverzögerung aufgebaut. Die in Bild 8-10 vorliegenden Versuchsergebnisse der Hauptversuche zeigen, dass 75 % aller Probanden bei automatisierten Bremsungen eine Gesamtreaktionszeit von unter 1,1 s haben. Ledig-

lich drei Probanden haben bei automatisierten Bremsungen eine länger als 1,3 s andauernde Gesamtreaktionszeit. Damit hat sich die Eingriffsdauer von 1,3 s für die Versuchsreihe bewährt. Es wird eine größtmögliche Wirksamkeit bei kleinstmöglichem Störungsmaß erzielt.

Nach Burckhardt wird die Gesamtreaktionszeit als „Verlust-Grundzeit zuzüglich Blickzuwendungszeit“ bezeichnet. Diese Zeit liegt zwischen 1,11 s (2 % aller Werte) und 1,62 s (98 % aller Werte), der Median liegt bei 1,47 s. Im Vergleich zeigt sich, dass Probanden bei der vorliegenden Untersuchung mit Frontalkollisionsgegenmaßnahmen (mit Ausnahme von *Seat Vibration & Symbol*) bis zu 50 % schneller reagiert haben. Der Zeitgewinn ist in der von Burckhardt „Reaktionsgrundzeit“ genannten Zeitspanne zu finden. Laut Burckhardt vergehen zwischen Blickzuwendungszeit und Umsetzzeit zusätzlich zwischen 0,22 s (2 % aller Werte) und 0,58 s (98% aller Werte), der Median liegt bei 0,45 s. Burckhardt definiert, dass alle Vorgänge sequentiell ablaufen. Dies ist bei der vorliegenden Untersuchung nicht zu beobachten. Bei allen Frontalkollisionsgegenmaßnahmen existieren Versuche, bei denen Probanden bereits vor Beendigung der Blickzuwendungszeit mit der Umsetzzeit beginnen, was für warnende Frontalkollisionsgegenmaßnahmen mit Hinweis auf eine Aktion (siehe Kapitel 6.1) interpretiert werden kann. Bei einer größeren Anzahl von Versuchen ergibt sich eine Reaktionsgrundzeit von unter 0,1 s (siehe dazu die Tabellen aller Reaktionszeiten im Anhang). Mit Kenntnis dieser Untersuchungsergebnisse von Burckhardt hätten längere Reaktionsgrundzeiten bei *Baseline*-Versuchen als bei Versuchen mit Frontalkollisionsgegenmaßnahmen erwartet werden können. Die Reaktionsgrundzeiten bei Versuchen der *Baseline* zeigen jedoch weder Abweichungen noch andere Auffälligkeiten gegenüber Reaktionsgrundzeiten bei Versuchen mit Frontalkollisionsgegenmaßnahmen. Eine Untersuchung von Zusammenhängen zwischen Reaktionsgrundzeit und der Umsetzzeit lieferte keine neuen Erkenntnisse.

Da insbesondere die Umsetzzeit aber ebenso die Betätigungszeit keine signifikanten Unterschiede zwischen den Frontalkollisionsgegenmaßnahmen hervorbringen, wird die Frage geprüft, ob die Blickzuwendungszeit alleine entscheidend für die Wirksamkeit bei warnenden Frontalkollisionsgegenmaßnahmen ist. Eine Korrelationsanalyse zwischen der Wirksamkeit der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen und der Blickzuwendungszeit ergibt das Diagramm im Bild 8-11.

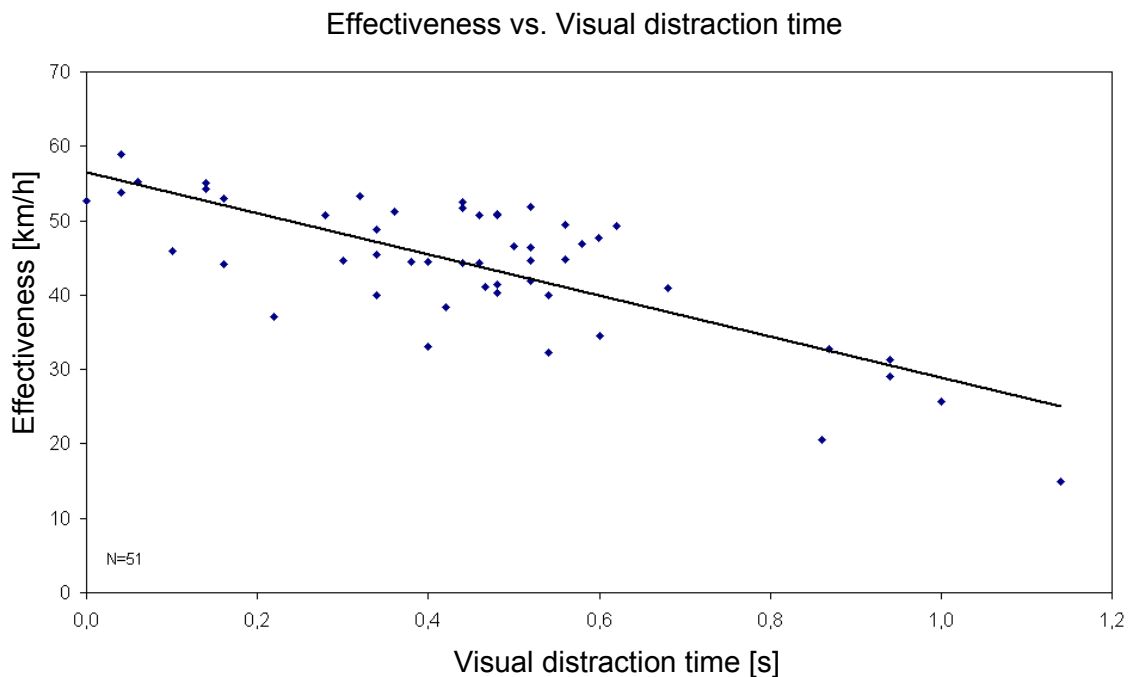


Bild 8-11: Korrelation Wirksamkeit zur Blickzuwendungszeit

Mit dem Test nach Pearson ergibt sich mit einem Korrelationskoeffizienten von $-0,761$ ein höchstsignifikanter Zusammenhang. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass für Situationen, die dem Versuchsaufbau entsprechen, die Frontalkollisionsgegenmaßnahme auf eine kurze Blickzuwendungszeit zielen muss, wenn die Wirksamkeit hoch sein soll. Sobald eine Blickzuwendung auf die Situation erfolgt, erkennt der Fahrer die Situation und kann mit dem bekannten Handlungsmuster „Fuß vom Gaspedal auf das Bremspedal umsetzen und dieses stark betätigen“ reagieren. Wie bereits in Abschnitt 4.2.4 genannt, ist davon auszugehen, dass stark bremsende Fahrzeuge Erkennungsmustern bei geübten Fahrern entsprechen.¹²³ Es wurde gezeigt, dass bei einigen Versuchen Probanden bereits vor dem Blick auf die Straße mit der Umsetzzeit beginnen (negative Reaktionsgrundzeit), was zu einer hohen Wirksamkeit führt.

Zusammenfassung:

Im Gegensatz zu den Hypothesen der Wirksamkeit und des Störungsmaßes kann für viele zeitliche Bewertungskriterien keine Rangfolge auf dem erforderlichen Signifikanzniveau ermittelt werden. Bei der Blickzuwendungszeit ergibt sich ein signifikanter Unterschied der drei besten Frontalkollisionsgegenmaßnahmen *Sound*, *Jerk* und *Full* gegenüber *Seat Vibration & Symbol*.

¹²³ Färber, B.: Bremsverhalten in Gefahrensituationen, 2007, S. 78

Wegen mangelnder Unterscheidbarkeit sind alle Umsetzzeiten der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen zusammengefasst. Auch in der Betätigungszeit reichen die Unterschiede nicht für eine Signifikanz aus. Eine qualitativ längere, jedoch nicht-signifikant längere Gesamtreaktionszeit von *Seat Vibration & Symbol* ist ursächlich für die vergleichsweise geringste Wirksamkeit. Gegenüber den Versuchen von Burckhardt fällt die Gesamtreaktionszeit um bis zu 50 % kürzer aus. Es konnte gezeigt werden, dass eine kurze Blickzuwendungszeit zu einer hohen Wirksamkeit führt.

8.4 Korrelationen

Hypothese 6 betrachtet den Zusammenhang zwischen der fahrzeugbezogenen Wirksamkeit und dem fahrzeugbezogenen Störungsmaß.

Hypothese 6: Korrelation zwischen Wirksamkeit und Störungsmaß
Je weniger wirksam die Frontalkollisionsgegenmaßnahme ist, desto weniger störend ist sie.

Die Hypothese bewertet den häufig als *Trade-off* bezeichneten Effekt, bei dem das Verbessern einer Eigenschaft zur Verschlechterung einer anderen Eigenschaft führen kann. Mit der Hypothese wird der Zusammenhang zwischen Wirksamkeit und Störungsmaß getestet. Bild 8-12 ordnet für jede FKGM den Median des fahrzeugbezogenen Störungsmaßes dem Median der fahrzeugbezogenen Wirksamkeit zu.

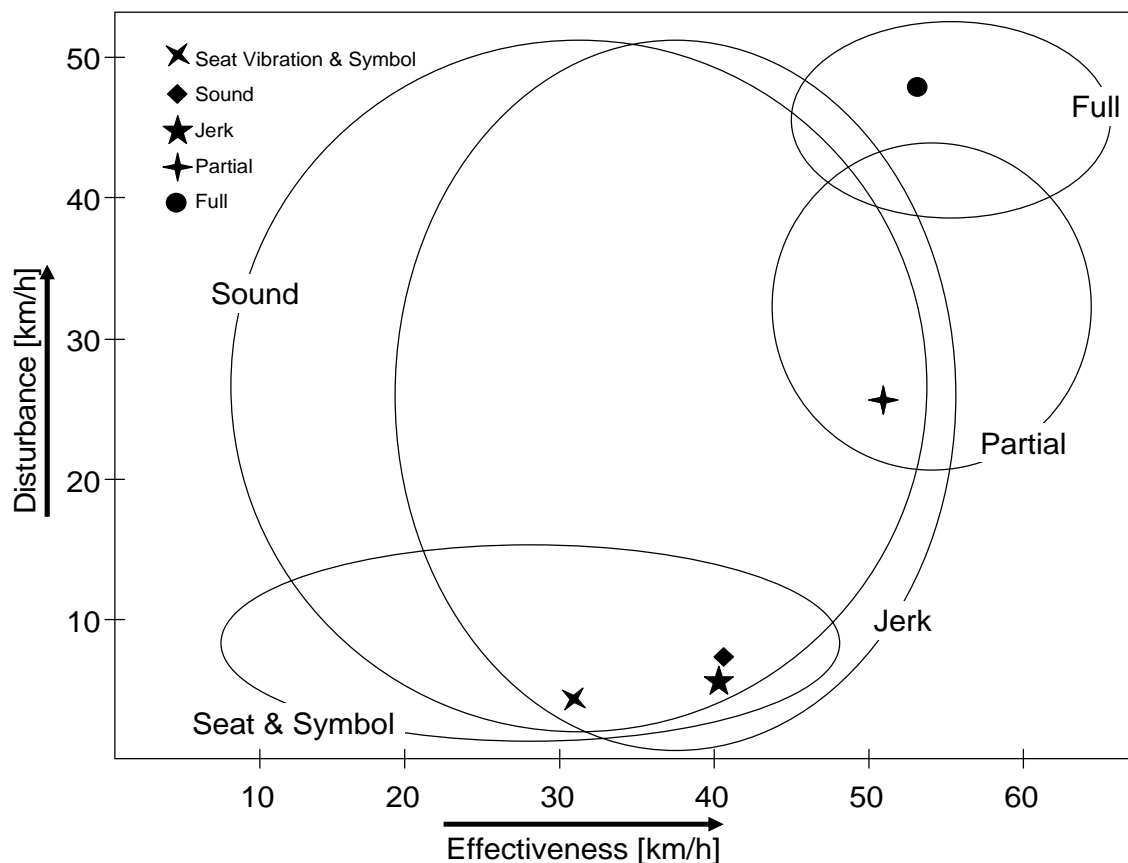


Bild 8-12: Fahrzeugbezogenes Störungsmaß über fahrzeugbezogener Wirksamkeit

Die Markierung als Punkte kennzeichnet den Median des Störungsmaßes bzw. der Wirksamkeit jeder Frontalkollisionsgegenmaßnahme. Die den Punkt umrundende Fläche gibt den Bereich der Maxima und Minima der Bewertungsgröße an.

Deutlich wird das geringe Störungsmaß der warnenden FKGM *Seat Vibration & Symbol*, *Jerk* und *Sound* gegenüber den länger andauernden autonomen Bremseingriffen *Partial* und *Full*. Insbesondere *Sound* zeigt eine hohe Wirksamkeit aber im Median auch ein geringes Störungsmaß auf. *Partial* ist vergleichbar wirksam wie *Full*, jedoch weniger störend. Die warnenden Frontalkollisionsgegenmaßnahmen sind vergleichsweise weniger störend als die eingreifenden Frontalkollisionsgegenmaßnahmen *Partial* und *Full*, es existieren jedoch Ausreißer (siehe dazu Bild 8-3). Sowohl *Sound* als auch *Jerk* weisen etwa 80 % der Wirksamkeit von *Partial* und *Full* auf, sind aber um den Faktor vier verzeihlicher. Mit einem Korrelationskoeffizienten nach Pearson von 0,846 ergibt sich ein nahezu signifikanter Zusammenhang zwischen der Wirksamkeit und dem Störungsmaß.¹²⁴ Die Hypothese, eine Frontalkollisionsgegenmaßnahme ist umso verzeihlicher je weniger wirksam sie ist, hat sich auch hier noch bewährt.

¹²⁴ Signifikanz von 0,071, ab 0,05 signifikant

Ein direkter Vergleich der probandenbezogenen Werte ist wegen der getrennt voneinander durchgeführten Versuchsreihen (einmal mit warnenden FKGM, zum anderen mit automatisierten Bremsungen) nicht möglich, weswegen die Hypothese nur für die fahrzeugbezogenen Werte betrachtet wird.

Der Vergleich der probandenbeurteilten Wirksamkeit (Hypothese 2) mit der probandenbeurteilten Verzeihlichkeit (Hypothese 4) bewährt für die warnenden Frontalkollisionsgegenmaßnahmen die Hypothese 6. Die Rangfolge der Wirksamkeit ist invers zum Störungsmaß. Damit gilt auch für die Probandeneinschätzung: Je weniger wirksam eine Frontalkollisionsgegenmaßnahme ist, desto verzeihlicher ist sie.

8.5 Abdeckungsrate und Informationsgehalt

In Kapitel 6.2 wurden die Begriffe Informationsgehalt, Abdeckungsrate und Verzeihlichkeit eingeführt. Die Verzeihlichkeit (bzw. das inverse Störungsmaß) von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen wurde bereits ausführlich behandelt. Die Abdeckungsrate beurteilt das Maß für die Verfügbarkeit eines Sinneskanals zum Übermitteln von Warnungen. Die probandenbeurteilte Abdeckungsrate jeder Frontalkollisionsgegenmaßnahme wurde nach jedem ersten Versuch per Fragebogen ermittelt. Bild 8-13 zeigt die prozentuale Elementwahrnehmung der gültigen ersten Versuche.

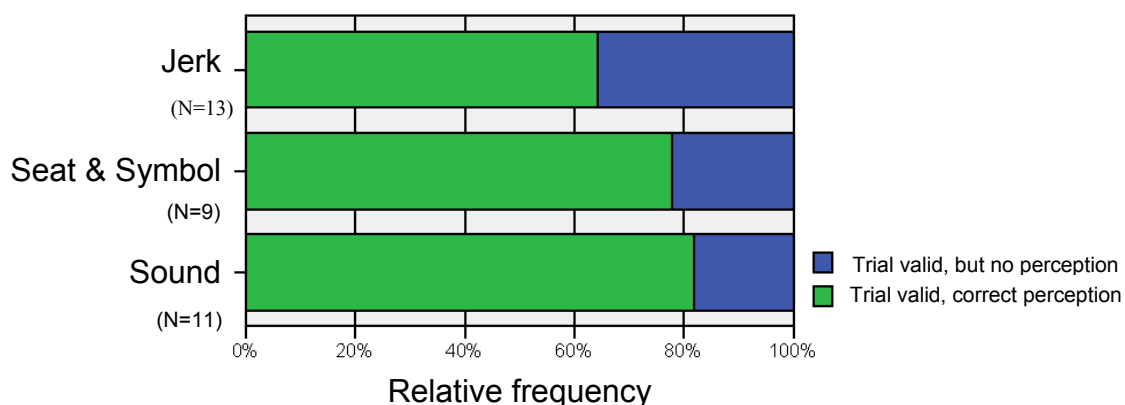


Bild 8-13: Wahrnehmung der Warnelemente

Für die warnenden Frontalkollisionsgegenmaßnahmen zeigt sich, dass *Sound* die größte Abdeckungsrate und *Jerk* die geringste Abdeckungsrate aufweist. Zehn von elf Probanden können *Sound* korrekt dem Geräusch eines vollverzögernden Fahrzeugs zuordnen. Hingegen können nur neun von 13 Probanden *Jerk* mit einer automatisierten Bremsung in Verbindung bringen. Acht von neun Personen haben *Seat Vibration* bemerkt, zwei weitere von diesen Probanden haben das rot blinkende *Symbol* im Kombi-Instrument

wahrgenommen. Bei den Versuchen zur Fehlauflösung hat kein Proband das rot blinkende *Symbol* bemerkt. Bei einem gültigen Voll- oder Teilbremseingriff gaben knapp 60 % der Probanden an, etwas bemerkt zu haben.

Der Informationsgehalt der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen wurde ebenfalls direkt im Anschluss an den ersten Versuch erfragt. Die Probanden konnten die Kategorien aus Kapitel 6.2 zur Beantwortung auswählen. Dabei zeigt sich bei den warnenden Frontalkollisionsgegenmaßnahmen nur bei *Sound* eine eindeutige Charakterisierung für „hinweisend auf eine Aktion“. Sieben von neun Probanden wählten diese Antwort aus. Bei den anderen warnenden Frontalkollisionsgegenmaßnahmen kann keine eindeutige Aussage getroffen werden. 13 von 22 Probanden ordnen beiden eingreifenden Frontalkollisionsgegenmaßnahmen einen „Hinweis auf die Aktion“, weitere zwei einen „Hinweis auf eine Situation“ zu. Im Fall von *Sound* nehmen die Probanden das Element bewusst wahr, was eine Erklärung für die schnelle Reaktionszeit der Probanden liefert. Im Gegensatz dazu wird die Schwäche von *Seat Vibration & Symbol*, dem Probanden keinen verständlichen Hinweis zu liefern, offensichtlich. Im Falle von *Jerk* kann die schnelle Reaktionszeit mit einer unterbewussten Wahrnehmung zusammenhängen. Diese Interpretation wird gestützt von den Bemerkungen von Lerner und Eckstein, es handle sich beim Bremsruck um eine gerichtete Information und damit größtenteils um einen fertigkeitbasierten Prozess (siehe Abschnitt 6.3.3). Wegen der geringen Unterschiede in der Wirksamkeit werden die beiden automatisierten Bremsingriffe zusammen betrachtet. Fast zweidrittel der Probanden empfanden den automatisierten Bremsingriff als „Hinweis auf eine Aktion“.

8.6 Fazit zu den Ergebnissen der Probandenversuche

Mit der Definition von Bewertungskriterien und unter Anwendung des Test- und Bewertungsverfahrens mit EVITA konnten unterschiedliche Eigenschaften der untersuchten Frontalkollisionsgegenmaßnahmen ermittelt werden. Die Ergebnisse gelten als exemplarisch für die realisierten und untersuchten Frontalkollisionsgegenmaßnahmen (siehe Beschreibung in Kapitel 6.3). Insbesondere die Hypothesen mit den neu definierten Kriterien Wirksamkeit und Störungsmaß bzw. Verzeihlichkeit zeigen erstmalig eine Differenzierung der Gegenmaßnahmen. Bis auf die Blickzuwendungszeit ergeben sich in den übrigen zeitlichen Bewertungsgrößen keine signifikanten Unterschiede. Unter Anwendung des Test- und Bewertungsverfahrens mit EVITA ist eine Differenzierung für diese Bewertungskriterien nicht bzw. nur unter Anwendung einer sehr hohen Probandenanzahl möglich. Mit den Ergebnissen wird ein hinreichendes Erklärungsmodell für die Wirksamkeit aufgestellt: So wird die schlechte Wirksamkeit des Warnelements

Seat Vibration & Symbol auf die sehr lange dauernde Blickzuwendungszeit zurückgeführt.

Die Unterschiede in der Wirksamkeit von *Jerk* gegenüber *Partial* sind zum großen Teil auf die länger andauernde automatisierte Bremsung bei *Partial* zurückzuführen. Nach Beendigung des 0,5 s dauernden Eingriffs vergehen bei *Jerk* im Mittel noch 0,4 s bis eine manuelle Vollverzögerung vom Fahrer aufgebaut ist. In dieser Zeit bremsst das Fahrzeug mit *Partial* mit 6 m/s^2 weiter, woraus eine Geschwindigkeitsdifferenz von 8,6 km/h resultiert. Diese entspricht annähernd dem Geschwindigkeitsunterschied zwischen *Jerk* und *Partial* in den Grenzen von 25 bis 75 %.

Zwischen *Partial* und *Full* ergeben sich keine bemerkenswerten Unterschiede. Der Verlauf des automatisierten Bremsdruckaufbaus bei *Full* und *Partial* ist bis zum Maximum bei *Partial* identisch. 50 % der Probanden reagieren mit einer manuell eingeleiteten Vollverzögerung, bevor die maximale Verzögerung von *Full* erreicht ist. Der Vorsprung der Wirksamkeit von *Full* gegenüber *Partial* fällt deshalb gering aus.

Ein Merkmalsdiagramm eignet sich für die vergleichende Darstellung der Mediane unterschiedlicher Kriterien, welche in Bild 8-14 für die warnenden Frontalkollisionsgegnmaßnahmen *Seat Vibration & Symbol*, *Sound* und *Jerk* zusammengefasst sind.

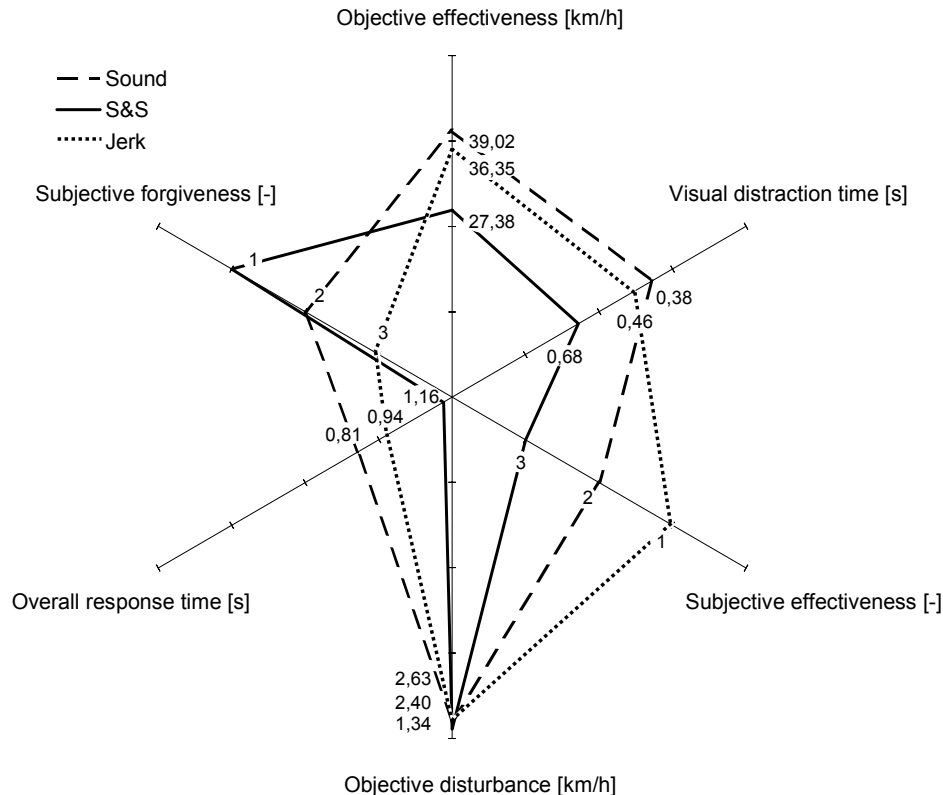


Bild 8-14: Merkmalsdiagramm der Warnelemente *Seat Vibration & Symbol*, *Sound* und *Jerk*

Aufgetragen sind die Mediane der Bewertungskriterien Wirksamkeit (Objective effectiveness), Blickzuwendungszeit (Visual distraction time), probandenbezogene Wirksamkeit (Subjective effectiveness), Störungsmaß (Objective disturbance), Gesamtreaktionszeit (Overall response time) und probandenbezogene Verzeihlichkeit (Subjective forgiveness). Je weiter ein Wert vom Zentrum (Schnittpunkt der Achsen) entfernt liegt, desto besser ist das Kriterium erfüllt.

Auf Grundlage des Merkmalsdiagramms können gewichtete Bewertungen für das Erzeugen von Empfehlungen festgelegt werden. So können beispielsweise die fahrzeugbezogene Wirksamkeit und die probandenbezogene Verzeihlichkeit sehr hoch gewichtet werden. In diesem Sinne erfolgt eine Empfehlung für die Frontalkollisionsgegenmaßnahme *Sound*, da sowohl die fahrzeugbezogene Wirksamkeit als auch die probandenbezogene Verzeihlichkeit größer sind als bei *Jerk*. Das Warnelement *Seat Vibration & Symbol* hat eine geringe Wirksamkeit, aber auch eine hohe Verzeihlichkeit. Bild 8-15 illustriert die Merkmale der FKGM *Partial* und *Full*.

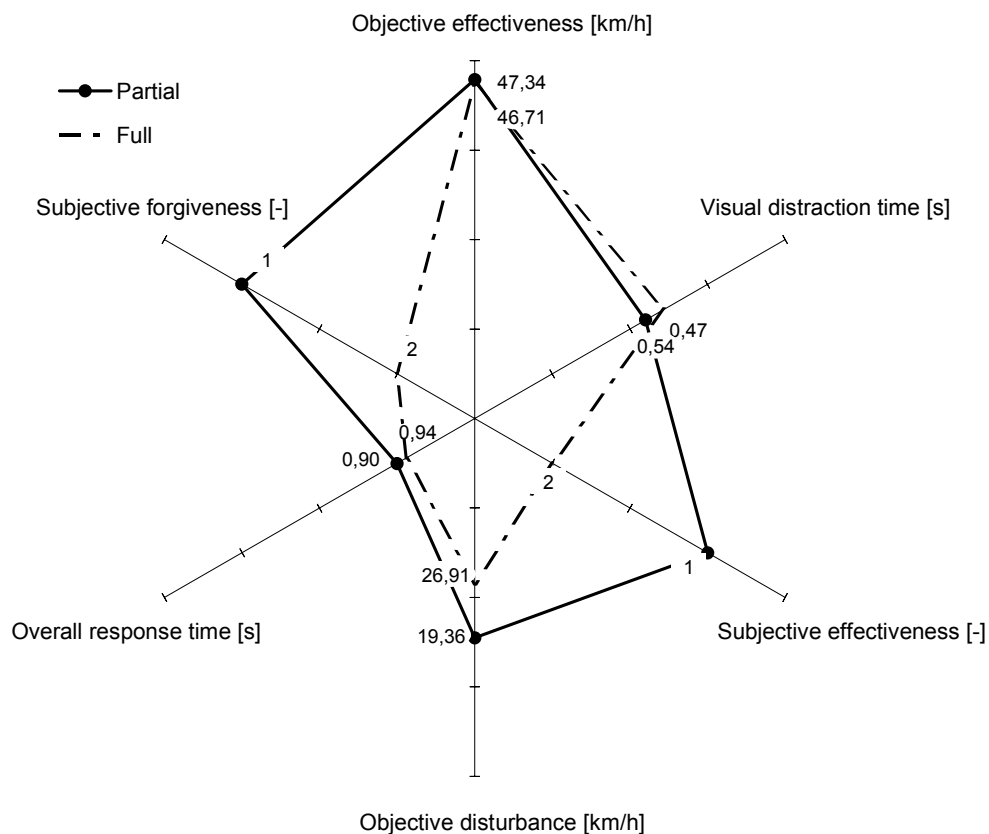


Bild 8-15: Merkmalsdiagramm der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen *Partial* und *Full*

Ersichtlich ist die gute Erfüllung vieler Merkmale durch *Partial*. Bis auf die Blickzuwendungszeit sind alle Bewertungskriterien besser als bei *Full* erfüllt.

9 Diskussion

Die Inhalte dieses Kapitels sind Betrachtungen zur Übertragbarkeit und zu Fehlern des Verfahrens. Als ein Aspekt der Leistungsfähigkeit wird die Trennschärfe des Verfahrens betrachtet. Die Validierung des Verfahrens bildet den Abschluss des Kapitels.

Von jeder wissenschaftlichen Messmethode wird die Erfüllung von Gütekriterien (im Sinne von Qualitätskriterien) gefordert: Objektivität, Reliabilität und Validität. Die Objektivität beschreibt, ob die Ergebnisse unabhängig von Einflüssen der Untersucher zustande gekommen sind. Diese Unabhängigkeit des Verfahrens gilt als erreicht, da alle Messgrößen mit einem standardisierten Vorgehen ermittelt wurden. Bei der Erhebung der Daten durch Fragebögen ist die Beeinflussung des Probanden durch fest vorgegebene Formulierungen auf ein Minimum reduziert worden. Der Begriff Reliabilität veranschaulicht die Zuverlässigkeit des Messverfahrens und den Einfluss von Messfehlern. Auf diese Punkte wird in Unterkapitel 9.2 eingegangen. Die Validität beurteilt die Tauglichkeit oder Gültigkeit des Verfahrens im Hinblick auf die Messung des gewünschten Merkmals. Dazu wurden Validierungskriterien definiert, die in Kapitel 9.4 mit Ergebnissen belegt werden.

9.1 Übertragbarkeit

Bei der Übertragung der Versuche auf reale Unfallsituationen sind die bekannten Einschränkungen mit Probanden im kontrollierten Feld zu berücksichtigen. Dazu zählt eine positive Einstellung der Probanden zu neuartigen Systemen, da davon auszugehen ist, dass diese ansonsten nicht freiwillig bei unbezahlten bzw. gering bezahlten Probandenversuchen teilnehmen würden. Damit geht auch eine positive Erwartungshaltung einher, die sich in den probandenbezogenen Bewertungen niederschlägt. Der Vorteil von Versuchen im kontrollierten Feld liegt in der hohen Reproduzierbarkeit der Versuche. Weiterhin sind bei einer Übertragung der Versuchsergebnisse die Charakteristika des Probandenkollektivs zu beachten. Auf eine gleichmäßige Altersverteilung wurde geachtet, jedoch sind Personen über 65 Jahren nicht vertreten. Bei einer Übertragung der Ergebnisse auf andere Nutzergruppen sind die spezifischen Eigenschaften der untersuchten Gruppen zu berücksichtigen.

9.2 Fehler

Mit einem Fehlermodell werden die Fehler des Darmstädter Test- und Bewertungsverfahrens mit EVITA betrachtet. Bild 9-1 zeigt die Prozessschritte vom Beginn der Versuchsdurchführung bis zur Bestimmung der fahrzeugbezogenen Bewertungskriterien.

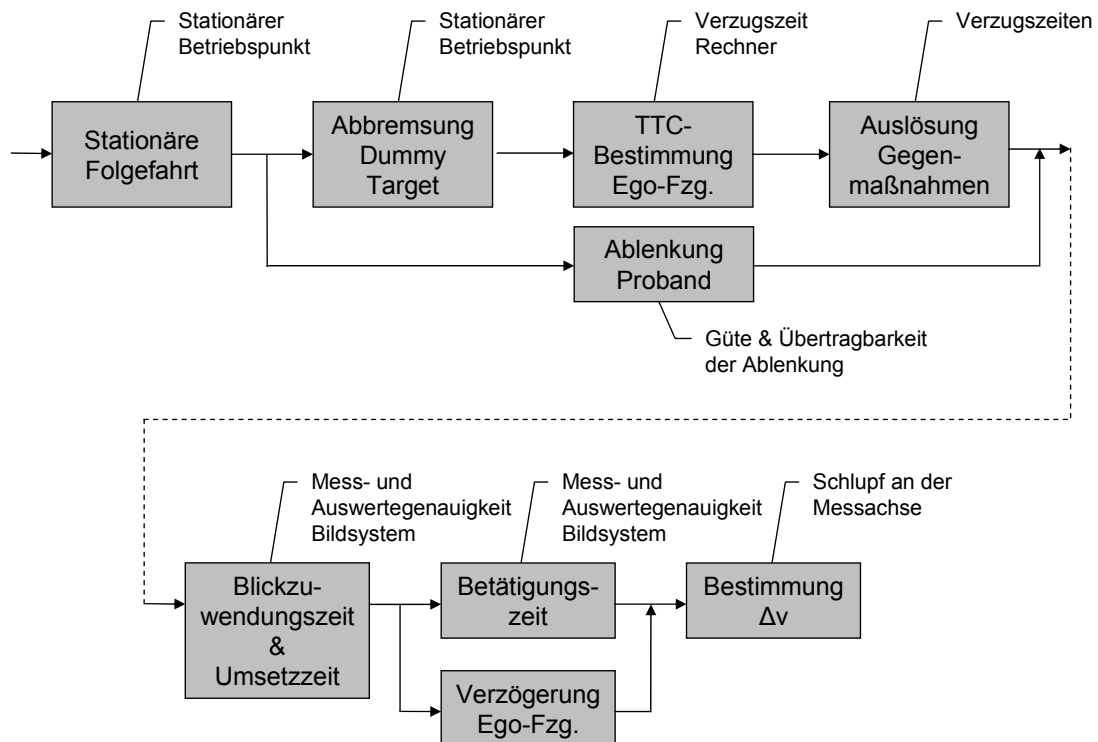


Bild 9-1: Fehlermodell

Die aus dem Modell ersichtlichen möglichen Fehlerquellen werden im Folgenden kommentiert.

Stationäre Folgefahrt:

Der Versuch beginnt mit einer stationären Folgefahrt. Der Bereich des korrekten Abstands wird dem Probanden über die Ampel angezeigt (siehe Kapitel 7.3). Der technische Versuchsleiter gibt nur dann die Aufforderung zum Durchführen eines Bremsvorgangs von EVITA, wenn der vorgeschriebene Abstand zwischen 20 und 25 m eingehalten wird. Ist dies nicht der Fall, wird eine weitere Runde auf dem Testgelände gefahren. Die Korrektheit des Abstands zum Auslösezeitpunkt wird bei der Auswertung zur Bestimmung der fahrzeugbezogenen Bewertungskriterien vom Messsystem angezeigt. Mit diesen Maßnahmen kann ein stationärer Betriebspunkt vorausgesetzt werden.

Abbremsung des Dummy Target:

Die Abbremsung des Dummy Target ist technisch als Steuerung durch die Vorgabe eines Sollmoments des Gleichstrommotors ausgeführt (vgl. Kapitel 4.2.1). Durch Einwirkungen von Temperatur, Feuchtigkeit und Schmutz auf die Radbremsen des Dummy Target sind Verschiebungen des Betriebspunkts möglich. Bedingt durch den hohen, einzeln stehenden Aufbau der Heckansicht können starke Winde in oder gegen die Fahrtrichtung sowohl zu einer stärkeren als auch zu einer geringeren Verzögerung führen. Aus Sichtweise des Probanden können diese Unterschiede als unerheblich gelten, da Differenzgeschwindigkeiten und –beschleunigungen nur sehr schlecht mit dem Auge bestimmt werden können.¹²⁵ Wie bereits in Kapitel 7.3.2 gezeigt, wird die Erschreckung des Probanden durch die Veränderung der Größe der Heckansicht des vorausfahrenden Dummy Target hervorgerufen. Trotzdem wurde die Beschleunigung des Dummy Target als Check-Routine in der Auswertung eingebunden.

TTC-Bestimmung und Auslösung der Gegenmaßnahmen:

Bei der Bestimmung des Auslösezeitpunkts sind die Verzugszeiten des gesamten technischen Systems zu berücksichtigen. Messungen ergaben Verzugszeiten im Bereich von 50 bis maximal 100 ms. Die Schwankung beansprucht den Beurteilungszeitraum und damit die Wirksamkeit der FKGM. Für die vorliegende Auswertung wurden die Schwankungen vernachlässigt.

Ablenkung der Probanden:

Die Art der Ablenkung der Probanden wurde in umfangreichen Vorversuchen ermittelt. Die einem realen Unfall vorausgehenden Verhaltensweisen eines Fahrzeugführers sind nur näherungsweise bekannt. Wie im Rahmen dieser Arbeit ersichtlich wird, zeigen Probanden in den durchgeführten Versuchen ein mit den Erkenntnissen der Analysen zum Unfallgeschehen vereinbarendes Verhalten. 60 % der Versuche sind als gültig zu deklarieren (Proband ist zum Zeitpunkt der Auslösung der FKGM abgelenkt). Bereits in Kapitel 2.2 wird der Stand der Technik zur Vergabe von Ablenkungsaufgaben erläutert, der im Rahmen der vorliegenden Studie berücksichtigt wurde. Auch für weitere Versuchsplanungen muss der zunächst gering erscheinende Anteil von 60 % vollständig abgelenkter Probanden angenommen werden. Der Anteil der abgelenkten Fahrer zum Auslösezeitpunkt lag bei den LKW-Fahrern mit 80 % etwas höher als bei den PKW-

¹²⁵ Krueger, H.: Sehfunktion versus Sehleistung, 1999, S. 6

Fahrern. Da auch nach Beendigung der Versuche keine Ablenkungsaufgabe mit einer vergleichbar hohen Realitätsnähe und einer hohen Ablenkungswirksamkeit bekannt ist, kann die Methode der Ablenkung mit dem Vorlesen der Navigationsanweisung zusammenfassend als valide und effizient gelten.

Bestimmung der Reaktionszeiten:

Blickzuwendungszeit, Umsetzzeit und Betätigungszeit werden über eine Kombination aus Kamera- und CAN-Daten bestimmt. In deren Fehler gehen die Abtastrate der Kameras von 20 ms sowie Ungenauigkeiten beim manuellen Auslesen ein. Durch die Anwendung einheitlicher Auswertestandards, wie etwa „Es gilt immer das erste Kamerabild, bei dem der Proband sicher das Bremspedal berührt hat“, sind diese Fehler minimiert worden und können deshalb vernachlässigt werden. Größere Auslesefehler werden durch Check-Routinen bei der Eingabe in die Datenerfassungsmaske (Excel-Datei) bereits angezeigt und können sofort korrigiert werden.

Bestimmung Δv :

Bei der Bestimmung der Geschwindigkeitsdifferenz gehen Auslesefehler sowie Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Geschwindigkeitsdifferenz am Ende der Gesamtreaktionszeit ein. Durch technische Besonderheiten beim allradgetriebenen Versuchsfahrzeug war das Verwenden des Geschwindigkeitssignals der Hinterachse für die Bestimmung der Geschwindigkeitsdifferenz am Ende der Gesamtreaktionszeit möglich. Wird ein anderes Messfahrzeug ohne die technische Besonderheit eines sehr geringen Schlupfs an der Hinterachse verwendet, so ist ein externer Geschwindigkeitsmesser vorzusehen. Die Geschwindigkeit der fahrzeugeigenen Sensorik wurde mit einem externen Geschwindigkeitsmesser überprüft. Bei Vollverzögerung des Fahrzeugs liegt der Geschwindigkeitsfehler konstant im Bereich zwischen 3 bis 4 %. Die Grundstreuung von Bremsversuchen kann bereits mit 2,75 % angesetzt werden.^{126,127}

Der drei- bis vierprozentige Fehler der fahrzeugeigenen Sensorik tritt für alle durchgeführten Versuche im gleichen Bereich und in die gleiche Richtung auf, sodass keine Änderung der Ergebnisse erwartet wird. Darüber hinaus ist bei der Auswertungsmethode nach Erreichen der 60-bar-Schwelle für alle Versuche in gleicher Weise mit einer

¹²⁶ Niemz, T: Reducing Braking Distance by Active Dampers, 2007, S. 132 ff

¹²⁷ Versuchsgelände Griesheim, N=35, Anfangsgeschwindigkeit 70 km/h, trockene Fahrbahn, harte Dämpfung und Sommerreifen

konstanten Verzögerung von 10 m/s² extrapoliert worden, so dass nur der Fehler bei Bestimmung der Geschwindigkeit Δv am Ende der Gesamtreaktionszeit in die Bestimmung der Wirksamkeit eingeht.

9.3 Trennschärfe des Verfahrens

Für das Verfahren wird die Trennschärfe definiert. Diese gibt den Medianunterschied bei gegebener Versuchsanzahl und Streuung zweier Verteilungen an, ab dem signifikante Unterschiede zwischen den Frontalkollisionsgegenmaßnahmen bestehen. Exemplarisch wird anhand des t-Tests die Trennschärfe bestimmt.

Zwei unabhängige Stichproben x_1, x_2, \dots, x_n und y_1, y_2, \dots, y_m haben die gegebenen Mittelwerte X und Y und die gegebene Standardabweichung s_x und s_y . Mit der Stichprobenstandardabweichung s

$$s = \sqrt{\frac{(n-1)s_x^2 + (m-1)s_y^2}{n+m-2}} \quad (9.1)$$

ergibt sich die Prüfgröße t zu

$$t = \sqrt{\frac{nm}{n+m}} \frac{X-Y}{s} \quad (9.2)$$

Wird dieser Term nach Y umgestellt, ergibt sich

$$Y = X - \frac{t}{\sqrt{\frac{nm}{n+m}}} s \quad (9.3)$$

Die Prüfgröße t ergibt sich aus dem geforderten Signifikanzniveau und der Stichprobengröße beispielsweise zu

$$|t| > t(1-\alpha, n+m-2) \quad (9.4)$$

Anhand einer t-Tabelle (siehe Anhang) wird die Prüfgröße t bestimmt.

Beispiel:

Es soll überprüft werden, bei welchem Mittelwert die Wirksamkeit von *Baseline* liegen müsste um gegenüber *Seat Vibration & Symbol* einen signifikanten Unterschied zu ergeben. Gegeben sind:

$X_{\text{Sitz}} = 36,19 \text{ km/h}$, $n = 9$, $s_{\text{Sitz}} = 12,6 \text{ km/h}$ und

$Y_{Baseline} = 34,67 \text{ km/h}$, $m = 10$, $s_{Baseline} = 12,96 \text{ km/h}$.

Mit einem einseitigen t-Test auf einem signifikanten Niveau wird $t(0,95, 17) = 1,74$ aus der t-Tabelle ermittelt. Daraus ergibt sich, dass $Y_{Baseline} = 25,96 \text{ km/h}$ betragen müsste, um bei gleicher (vergleichsweise breiter) Streuung die Gleichheit beider Verteilungen auf einem signifikanten Niveau abzulehnen.

9.4 Validierung des Überraschungseffekts

Das Darmstädter Test- und Bewertungsverfahren mit EVITA wurde angewendet und hat Erkenntnisse über Frontalkollisionsgegenmaßnahmen erbracht. Neben den bereits in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Bewertungskriterien sind zur Validierung des Verfahrens zwei weitere, unabhängige Kriterien zur Beurteilung des Überraschungs- und Erschreckungseffekts erstellt worden: Die Herzschlagfrequenz als Indikator für die emotionale Beanspruchung und der Hautleitwert als Indikator für die physiologische Beanspruchung der Probanden. Mit diesen Kriterien wird die „Erschrecktheit“ der Probanden nach erfolgreicher Ablenkung und anschließendem Eingriff einer FKGM geprüft. Die Validierung der Frage, ob FKGM zu einer Verringerung der Unfälle bzw. der Unfallschwere führen, kann erst nach Langzeitstudien ermittelt werden. So konnte beispielsweise bei Fahrzeugen von Mercedes eine Verringerung der Unfallzahlen nach der serienmäßigen Ausstattung durch ESP aufgezeigt werden.

In den Versuchen mit automatisierten Bremsungen sind zur Bestimmung der emotionalen Beanspruchung der Hautleitwert und die Herzschlagfrequenz der Probanden aufgenommen worden. Bild 9-1 zeigt den Hautleitwert und Bild 9-2 die Herzschlagfrequenz der Testpersonen im ersten Versuch für drei verschiedene AGB-Varianten.¹²⁸

¹²⁸ Gemessen vom Institut für Arbeitswissenschaften, 2007

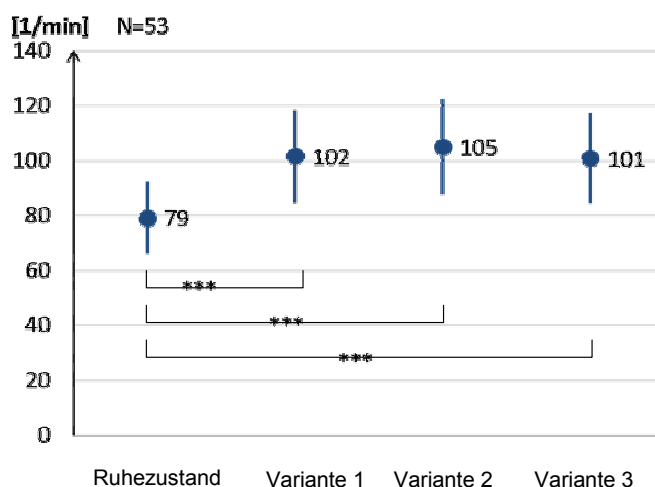


Bild 9-1: Verteilung der Herzschlagfrequenz der Probanden im ersten Versuch

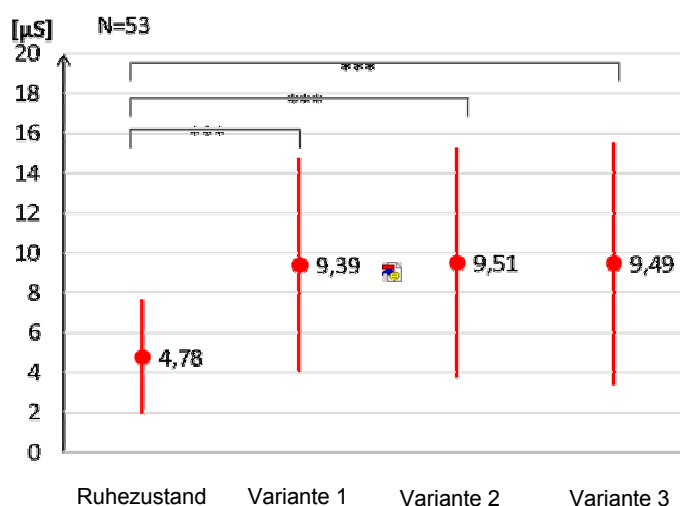


Bild 9-2: Verteilung des Hautleitwerts der Probanden im ersten Versuch

Zu erkennen ist die generelle signifikante Erhöhung des Hautleitwerts und der Herzschlagfrequenz bei der Durchführung eines Versuchs mit einem Notbremsmanöver gegenüber dem Ruhezustand. Die Werte des Ruhezustands sind während der Fahrt in den Minuten vor der Auslösung einer Bremsung von EVITA ermittelt worden. Der generelle Versuchszweck der Methodik, eine Schrecksituation durch ein Bremsmanöver des vorausfahrenden Fahrzeugs zu erzeugen, gilt als erreicht.

Direkt nach Beendigung des ersten Notbremsversuchs wurden die Probanden nach der Einschätzung der soeben erlebten Fahrsituation und deren Reaktion befragt. Bild 9-3 zeigt die Antworten der Probanden nach Antwortklassen.

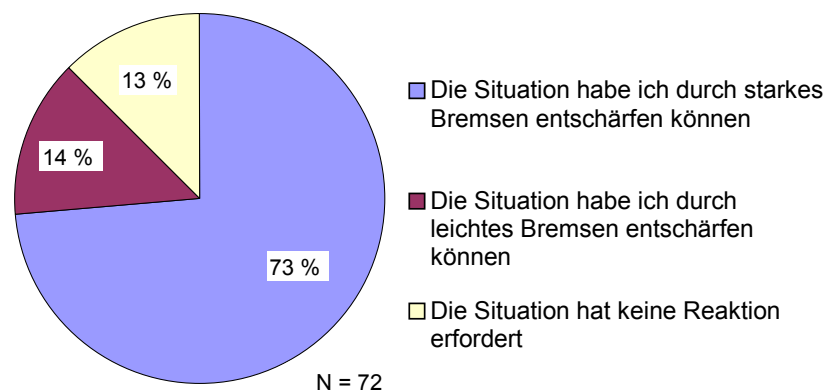


Bild 9-3: Wahrnehmung der Situation durch die Probanden

Knapp dreiviertel der Probanden gaben an, die Situation nur durch scharfes Bremsen entschärft haben zu können. Dies wird als Beleg für eine kritische Fahrsituation gewertet. Das Darmstädter Test- und Bewertungsverfahren mit EVITA wurde für LKW-Versuche zu automatisierten Teil- und Vollbremsungen mit 29 Probanden angewendet. Es hat sich gezeigt, dass das Verfahren ohne Einschränkungen der Funktionalität übertragbar ist. Trotz der hohen Sitzposition werden zum PKW vergleichbare Schrecksituationen aus Sicht des LKW-Fahrers erzeugt, wofür die Bestimmung der Herzschlagfrequenz und des Hautleitwerts die Kenngröße ist. Sowohl diese Indikatoren zur physiologischen Beanspruchung als auch die Befragung der Probanden zur Wahrnehmung der Situation zeigen Übereinstimmung mit den PKW-Versuchen.

Die Ergebnisse der LKW-Versuchsreihen zeigen eine höchstsignifikant höhere Wirksamkeit einer Vollverzögerung gegenüber einer Teilverzögerung. Wegen des pneumatischen Bremssystems steht der Bremsdruck im Gegensatz zum hydraulischen Bremssystem im Versuchs-PKW nahezu verzögerungsfrei zur Verfügung. Einen Überblick über die Ergebnisse finden sich weiterführender Literatur.^{129,130}

Resümee:

Zusammenfassend ist das Postulat aus Kapitel 3.3 erfüllt: Frontalkollisionsgegenmaßnahmen sind im realen Fahrversuch mit Probanden und mit der Erzeugung kritisch erscheinender Situationen eingeordnet und bezüglich ihrer Wirksamkeit bewertet. Für die Wirksamkeiten konnten sowohl Gruppen mit signifikanten Unterschieden ermittelt als auch eine Rangfolge gebildet werden.

¹²⁹ Fecher, N. et al.: FISITA, 2008

¹³⁰ Fecher, N. et al.: ATZ, 2008

10 Zusammenfassung

Am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt wurde das Darmstädter Test- und Bewertungsverfahren mit EVITA entwickelt und angewendet. Ausgangspunkt für die Entwicklung des Verfahrens ist die Fragestellung, ob Frontalkollisionsgegenmaßnahmen (FKGM) bezüglich ihrer Eignung zur Unfallvermeidung in eine Rangfolge gebracht werden können. Bisher wurden Untersuchungen zur Wirksamkeit von FKGM im Simulator durchgeführt. Einschränkungen in der Aussagekraft mussten in Kauf genommen werden. In der vorliegenden Untersuchung wurden hingegen Situationen im realen Fahrversuch mit unvorbereiteten Probanden nachgestellt. Dazu wurden die Situationen ausgewählt, wie sie Zweidritteln aller Auffahrunfälle vorausgehen. Zu diesem Zweck wurde ein Versuchswerkzeug entwickelt, welches aus einem Zugfahrzeug (herkömmlicher PKW) mit einer Seilwinde und einem gezogenen Anhänger (genannt Dummy Target) mit der Heckansicht eines realen Fahrzeugs besteht. Einer langen Tradition am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt folgend, wurde dieser Eigenbau mit einem weiblichen Namen versehen: EVITA.

Im Versuch folgt ein Proband in einem weiteren, mit Frontalkollisionsgegenmaßnahmen ausgerüsteten Versuchsfahrzeug der vorausfahrenden EVITA. Während der stationären Folgefahrt und der Ablenkung des Probanden bremst der gezogene Anhänger überraschend ab. Wird eine kritische Schwelle unterschritten, so greifen im Probandenfahrzeug ausgewählte FKGM ein. Wird durch diese Gegenmaßnahmen oder durch die Aktion des Probanden der drohende Auffahrunfall nicht verhindert, so wird der Anhänger mithilfe eines automatisierten Prozesses aktiv aus dem Gefahrenbereich gezogen. Dabei wirkt auf den Anhänger eine Beschleunigung von über 20 m/s^2 . Die minimale Time-To-Collision (TTC) zwischen dem Anhänger und dem Versuchsfahrzeug liegt mit unter einer Sekunde in einem extrem dynamischen Bereich. Eine Kollisionsvermeidung durch Ausweichen des Versuchsfahrzeugs wäre zu diesem Zeitpunkt unter günstigen Bedingungen gerade noch möglich. Messungen der emotionalen Beanspruchung der Probanden belegen den Erschreckungseffekt der Situation. Das Verfahren ist durch mehr als 1.500 Versuche ohne Fehlfunktion validiert. Es steht damit ein objektives Bewertungsverfahren unter Einbeziehung des Fahrers zur Bewertung und Entwicklung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen zur Verfügung.

Im Versuchsfahrzeug kamen folgende FKGM zur Anwendung: *Seat Vibration & Symbol* (Vibration des Fahrersitzes mit Warnsymbol im Kombiinstrument), *Jerk* (automatisierter Bremsruck), *Sound* (Reifenquietschen aus Lautsprecher) sowie *Partial* und *Full* (automatisierter Teil- bzw. Vollbremseingriff für die Dauer von 1,3 s).

Durch die Definition von neuartigen Bewertungskriterien wie der Wirksamkeit und des Störungsmaßes sowie der Verwendung bekannter Bewertungskriterien wurde eine teilweise signifikante bis höchstsignifikante Differenzierung der ausgewählten Frontalkollisionsgegenmaßnahmen erreicht. In dieser Hinsicht können für die Wirksamkeit drei Gruppen von FKGM ermittelt werden: Die Gruppe von *Baseline* (Versuch ohne Warnung) und *Seat Vibration & Symbol* erzielt eine geringere Wirksamkeit als die Gruppe von *Jerk* und *Sound*. Die Unterschiede zwischen *Jerk* und *Sound* gegenüber *Baseline* sind signifikant. Die Wirksamkeiten der automatisierten Bremsungen *Partial* und *Full* sind ähnlich und höchstsignifikant höher als die Wirksamkeit der *Baseline*.

Mit einer Korrelationsanalyse konnte gezeigt werden, dass die Blickzuwendungszeit die Wirksamkeit der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen begründet. *Sound*, *Jerk* und *Full* erzielen eine signifikant kurze Blickzuwendungszeit als *Seat Vibration & Symbol*. Bei der Umsetzzeit ergeben sich keine signifikanten Unterschiede innerhalb der untersuchten FKGM. Jedoch konnte gezeigt werden, dass ältere Probanden signifikant kürzere Umsetzzeiten erzielen. Bei der Betätigungszeit sind die Unterschiede zwischen den Frontalkollisionsgegenmaßnahmen als unerheblich einzustufen. Die Gesamtreaktionszeit fasst alle Einzelreaktionszeiten zusammen und zeigt die FKGM *Sound*, *Jerk*, *Partial* und *Full* bei einem Median von 0,8 bis 0,9 s, während *Seat Vibration & Symbol* bei 1,2 s liegt.

11 Ausblick

Im Rahmen der Arbeit wurden sowohl eine Bewertungsmethodik als auch Frontalkollisionsgegenmaßnahmen zur anschließenden Bewertung entwickelt. Für die zukünftige Anwendung des Verfahrens ergibt sich die Fragestellung, welche Ergebnisse die bereits in Serie befindlichen Systeme erzielen. Bis auf die warnende Frontalkollisionsgegenmaßnahme *Seat Vibration & Symbol* können alle untersuchten Maßnahmen als intensive Warnungen bzw. als intensive Intervention gelten. Wie der Stand der Technik der Frontalkollisionsgegenmaßnahmen zeigt (siehe Kapitel 2.1), entsprechen serienmäßige Maßnahmen zumindest in der ersten Warnstufe eher der Frontalkollisionsgegenmaßnahme *Seat Vibration & Symbol*. Es kann vermutet werden, dass eine geringere Wirksamkeit zugunsten eines geringeren Störungsmaß bzw. einer hohen Verzeihlichkeit gewählt wurde.

Für das Versuchswerkzeug EVITA und die dazugehörigen Bewertungskriterien stellen sich weitere interessante Anwendungsbereiche heraus, die im Folgenden kurz und ohne Anspruch auf Vollständigkeit aufgezählt werden.

Bewertung von Systemen der aktiven Sicherheit:

Bewertungsverfahren für Systeme der passiven Sicherheit sind als Standards vorhanden (beispielsweise Euro NCAP). Für Systeme der aktiven Sicherheit fehlt ein Standard bisher (siehe Kapitel 3.1). Das Darmstädter Verfahren mit EVITA bietet sich hierzu an. Geeignet erscheint das Verfahren sowohl für neue Bewertungen des Euro NCAP, genannt Beyond NCAP¹³¹, als auch für die Versicherungswirtschaft zum Einstufen der Fahrzeuge. Alle Probanden konnten in den durchgeführten Versuchen der Studie – natürlich mit unterschiedlichem Erfolg – zur Reduktion der gedachten Unfallschwere beitragen. Daraus leitet sich die Forderung ab, für den integrierenden Test von Systemen der aktiven und passiven Sicherheit den Fahrer einzubeziehen, um die Gesamtwirkung zu beurteilen. Dazu ist zu prüfen, inwiefern die in dieser Arbeit definierten Bewertungskriterien für eine standardisierte Anwendung geeignet sind. Bei dieser standardisierten Anwendung muss davon ausgegangen werden, dass CAN-Daten des zu testenden Fahrzeugs nicht verfügbar sind.

¹³¹ Van Ratingen, M.: Next Euro NCAP, 2008

Die Bewegungsgrößen des Ego-Fahrzeugs müssen dann entweder mit im Fahrzeug integrierter zusätzlicher Messtechnik erfasst werden oder alternativ vom Versuchswerkzeug (Dummy Target).

Für die Bestimmung der zeitlichen Bewertungskriterien und der Fahrerreaktionen ist ein fahrzeugunabhängiges Kamerasystem vorzusehen. Der Auslösezeitpunkt der Gegenmaßnahmen muss mit diesem mobilen Messsystem erfasst werden, die Länge des Beurteilungszeitraums ist anzupassen.

Test von Pre-Crash-Systemen:

Es befinden sich Systeme in der Entwicklung, die einen drohenden Unfall mit Umfeldsensoren bereits vor einem Aufprall detektieren können.¹³² Für diese Systeme eignet sich EVITA als Funktionstestverfahren für das Gesamtsystem bzw. für das Sensorkonzept. Durch eine Gewichtsreduktion des Dummy Target kann bereits eine TTC von knapp unter 0,5 s erzielt werden. Für eine weitere Reduzierung der TTC ist eine genauere Berechnung des Aufprallzeitpunkts vorzusehen, sodass das Auslösen der kollisionsvermeidenden Maßnahme von EVITA zeitlich exakter gesteuert werden kann.

Validierung von Fahrsimulatoren:

Das Werkzeug EVITA erscheint als Mittel zur Validierung von Fahrsimulatoren geeignet. Durch vergleichende Studien mit Unfallsituationen im Simulator und mit EVITA kann das Verbesserungspotential von Simulatoren ermittelt werden. Dazu können beispielsweise für eine identische Situation die Reaktionen der Probanden im Simulator mit denen der Probanden bei Anwendung von EVITA verglichen werden.

Trainingswerkzeug für PKW- und LKW-Fahrer:

Wie bereits in Kapitel 1 (Einleitung) ersichtlich wurde, führt menschliches Fehlverhalten häufig zu schweren Unfällen. Durch das mehrfache Nachstellen von Unfallsituationen mit EVITA können PKW-Fahrer und insbesondere LKW-Fahrer auf das richtige Verhalten hin trainiert werden.

¹³² Beispielsweise Pre-Crash-Systeme von Bosch

12 Anhang

Die folgenden Tabellen zeigen die Signifikanzen der Bewertungskriterien auf. Zahlen in **Fettschrift** kennzeichnen ein Signifikanzniveau kleiner als 0,05 (hochsignifikant).

Tabelle 12-1 zeigt die Signifikanzen der Wirksamkeit. Die Wirksamkeit ist die Reduktion der Fahrzeuggeschwindigkeit im Beurteilungszeitraum während des ersten Versuchs und vorhandener Kollisionsgefahr.

Tabelle 12-1: Signifikanzen Wirksamkeit für alle FKGM

	<i>S&S</i>	<i>Jerk</i>	<i>Partial</i>	<i>Full</i>	<i>Baseline</i>
<i>Sound</i>	0,163	0,846	0,037	0,019	0,074
<i>S&S</i>	-	0,097	0,00083	0,00034	0,723
<i>Jerk</i>	-	-	0,042	0,021	0,037
<i>Partial</i>	-	-	-	0,819	0,00018
<i>Full</i>	-	-	-	-	6,420* e⁻⁵

Tabelle 12-2 zeigt die Signifikanzen des Störungsmaßes. Das Störungsmaß bewertet die Geschwindigkeitsreduktion in einem Versuch ohne Kollisionsgefahr.

Tabelle 12-2: Signifikanzen Störungsmaß bei Fehlauflösung

	<i>S&S</i>	<i>Jerk</i>	<i>Partial</i>	<i>Full with release</i>	<i>Full in a halt</i>
<i>Sound</i>	0,024	0,885	0,076	0,007	1,74* e⁻¹⁰
<i>S&S</i>	-	0,015	0,000131	6,56* e⁻⁶	1,47* e⁻¹³
<i>Jerk</i>	-	-	0,091	0,008	9,85* e⁻¹¹
<i>Partial</i>	-	-	-	0,280	5,02* e⁻⁸
<i>Full with release</i>	-	-	-	-	9,16* e⁻⁶

Tabelle 12-3 zeigt die Signifikanzen der Blickzuwendungszeit. Die Blickzuwendungszeit beginnt mit dem Auslösen der FKGM und endet beim Blick auf die Straße vor dem Versuchsfahrzeug.

Tabelle 12-3: Signifikanzen Blickzuwendungszeit im ersten Versuch

	<i>S&S</i>	<i>Jerk</i>	<i>Partial</i>	<i>Full</i>
<i>Sound</i>	0,047	0,996	0,769	0,645
<i>S&S</i>		0,037	0,079	0,012
<i>Jerk</i>			0,753	0,631
<i>Partial</i>				0,435

Tabelle 12-4 listet die Signifikanzen der Umsetzzeit auf. Diese Zeitdauer beginnt mit dem Lösen des rechten Fußes vom Gaspedal und endet beim ersten Kontakt mit dem Bremspedal.

Tabelle 12-4: Signifikanzen Umsetzzeit im ersten Versuch

	<i>S&S</i>	<i>Jerk</i>	<i>Partial</i>	<i>Full</i>	<i>Baseline</i>
<i>Sound</i>	0,663	0,878	0,426	0,342	0,271
<i>S&S</i>	-	0,550	0,742	0,660	0,545
<i>Jerk</i>	-	-	0,328	0,248	0,194
<i>Partial</i>	-	-	-	0,926	0,781
<i>Full</i>	-	-	-	-	0,840

Tabelle 12-5 zeigt die Signifikanzen der Betätigungszeit. Die Betätigungszeit beginnt beim ersten Kontakt des rechten Fußes mit dem Bremspedal und endet bei der maximal erreichbaren Fahrzeugverzögerung.

Tabelle 12-5: Signifikanzen Betätigungszeit im ersten Versuch

	<i>S&S</i>	<i>Jerk</i>	<i>Partial</i>	<i>Full</i>	<i>Baseline</i>
<i>Sound</i>	0,490	0,815	0,887	0,250	0,291
<i>S&S</i>	-	0,339	0,570	0,686	0,732
<i>Jerk</i>	-	-	0,695	0,141	0,176
<i>Partial</i>	-	-	-	0,301	0,347
<i>Full</i>	-	-	-	-	0,961

Tabelle 12-6 zeigt die Signifikanzen der Betätigungszeit. Die Betätigungszeit beginnt beim ersten Kontakt des rechten Fußes mit dem Bremspedal und endet bei der maximal erreichbaren Fahrzeugverzögerung.

Tabelle 12-6: Signifikanzen Gesamtreaktionszeit im ersten Versuch

	<i>S&S</i>	<i>Jerk</i>	<i>Partial</i>	<i>Full</i>
<i>Sound</i>	0,147	0,718	0,926	0,683
<i>S&S</i>	-	0,232	0,117	0,262
<i>Jerk</i>	-	-	0,639	0,953
<i>Partial</i>	-	-	-	0,605

Tabelle 12-7 zeigt die Berechnung zur Rangfolge bei der probandenbeurteilten Wirksamkeit der warnenden FKGM.

Tabelle 12-7: Rangfolge zur probandenbeurteilten Wirksamkeit bei Seat Vibration & Symbol, Sound und Jerk

			Sound zu Sitz- vibration mit Symbol	Sound zu Bremsruck	Sitzvibration mit Symbol zu Bremsruck
Normierte, relative Wirksamkeit	-1	Anzahl	19	17	17
		% von Gesamt	45,2%	63,0%	70,8%
	+1	Anzahl	23	10	7
		% von Gesamt	54,8%	37,0%	29,2%
	Gesamt		42	27	24
	% von Gesamt		100,0%	100,0%	100,0%
Arithmetisches Mittel über Gesamt			0,0952	-0,2593	-0,4167

Tabelle 12-8 zeigt die Berechnung zur Rangfolge bei der probandenbeurteilten Wirksamkeit der automatisierten Bremsungen.

Tabelle 12-8: Rangfolge der probandenbeurteilten Verzeihlichkeit bei Seat Vibration & Symbol, Sound und Jerk

			Sound zu Sitz- vibration mit Symbol	Sound zu Bremsruck	Sitzvibration mit Symbol zu Bremsruck
Normierte, relative Verzeihlichkeit	-1	Anzahl	33	12	4
		% von Gesamt	78,6%	44,4%	16,7%
	+1	Anzahl	9	15	20
		% von Gesamt	21,4%	55,6%	83,3%
	Gesamt		42	27	24
	% von Gesamt		100,0%	100,0%	100,0%
Arithmetisches Mittel über Gesamt			-0,5714	0,1111	0,6667

Tabelle 12-9 zeigt die Werte zu allen fahrzeugbezogenen Beurteilungskriterien beim ersten und gültigen Versuch.

Tabelle 12-9: Übersicht über alle gültigen ersten Versuche

Proband	Versuch	Wirksamkeit [km/h]	Blickzuwen- dungszeit [s]	Umsetzzeit [s]	Betätigungszeit [s]	Gesamtreak- tionszeit [s]
---------	---------	-----------------------	------------------------------	----------------	------------------------	------------------------------

Ruck

P11	V1	40,24	0,48	0,26	0,2	1,00
P14	V1	54,22	0,14	0,16	0,06	0,58
P22	V1	45,39	0,34	0,16	0,2	0,86
P28	V1	58,24	-0,08	0,08	0,08	0,42
P29	V1	46,60	0,50	0,22	0,2	0,88
P34	V1	51,16	0,36	0,00	0,38	0,86
P35	V1	39,96	0,54	0,28	0,2	1,06
P38	V1	44,39	0,40	0,22	0,18	0,88
P40	V1	41,39	0,48	0,32	0,2	1,00
P41	V1	44,33	0,44	0,26	0,18	0,94
P43	V1	20,50	0,86	0,22	0,14	1,50
P47	V1	34,55	0,60	0,12	0,18	1,20
P49	V1	37,16	0,22	0,20	0,3	1,04

Sitz&Symbol

P02	V1	45,95	0,10	0,03	0,23	0,80
P06	V1	32,70	0,87	0,00	0,5	1,37
P20	V1	40,93	0,68	0,46	0,62	0,96
P25	V1	15,00	1,14	0,12	0,16	1,64
P27	V1	55,11	0,14	0,16	0,2	0,52
P33	V1	25,71	1,00	0,24	0,24	1,36
P45	V1	48,80	0,34	0,20	0,24	0,70
P46	V1	29,11	0,94	0,14	0,24	1,28
P48	V1	32,27	0,54	0,14	0,2	1,16

Proband	Versuch	Wirksamkeit [km/h]	Blickzuwen- dungszeit [s]	Umsetzzeit [s]	Betätigungszeit [s]	Gesamtreak- tionszeit [s]
---------	---------	-----------------------	------------------------------	----------------	------------------------	------------------------------

Sound

P04	V1	41,15	0,47	0,14	0,3	0,93
P16	V1	50,67	0,28	0,22	0,26	0,64
P18	V1	44,63	0,30	0,38	0,16	0,80
P19	V1	44,50	0,38	0,29	0,16	0,78
P21	V1	33,13	0,40	0,18	0,28	1,18
P24	V1	53,87	-0,10	0,14	0,3	0,58
P26	V1	40,01	0,34	0,18	0,18	0,96
P32	V1	38,33	0,42	0,10	0,16	1,00
P36	V1	31,25	0,94	0,18	0,2	1,28
P42	V1	44,22	0,16	0,22	0,16	0,82

Baseline

P07	V1	7,62	1,54	0,23	0,83	2,51
AGB-BL_p01	V1	36,81	0,05	0,32	0,35	1,08
AGB-BL_p04	V1	19,17	0,93	0,20	0,28	1,56
AGB-BL_p08	V1	42,86	0,64	0,08	0,18	0,88
AGB-BL_p11	V1	35,51	0,36	0,16	0,34	1,12
AGB-BL_p12	V1	48,13	0,50	0,18	0,24	0,7
AGB-BL_p17	V1	36,32	0,52	0,12	0,2	1,04
AGB-BL_p20	V1	38,86	0,42	0,16	0,14	0,98
AGB-BL_p64	V1	50,55	0,14	0,02	0,46	0,76
AGB-BL_p67	V1	30,80	0,76	0,16	0,28	1,24

Proband	Versuch	Wirksamkeit [km/h]	Blickzuwen- dungszeit [s]	Umsetzzeit [s]	Betätigungs- zeit [s]	Gesamtreak- tionszeit [s]
---------	---------	-----------------------	------------------------------	----------------	--------------------------	------------------------------

AGB Voll

AGB-AV_p22	V1	50,93	0,48	0,14	0,12	0,78
AGB-AV_p23	V1	52,60	0,00	0,14	1,38	1,42
AGB-AV_p24	V1	53,76	0,04	0,32	1,3	1,42
AGB-AV_p25	V1	46,40	0,52	0,08	0,08	0,96
AGB-AV_p26	V1	50,67	0,48	0,10	0,12	0,72
AGB-AV_p30	V1	65,66	-0,16	0,12	0,08	0,42
AGB-AV_p35	V1	55,20	0,06	0,12	0,12	0,62
AGB-AV_p37	V1	51,71	0,44	0,22	0,26	1,18
AGB-AV_p38	V1	44,25	0,46	0,22	0,1	0,98
AGB-AV_p39	V1	52,48	0,44	0,20	0,14	0,84
AGB-AV_p40	V1	44,58	0,52	0,18	0,12	1,1
AGB-AV_p49	V1	51,93	0,52	0,20	0,2	0,92

AGB Teil

AGB-AT_p41	V1	41,90	0,52	0,12	0,12	1,14
AGB-AT_p43	V1	44,76	0,56	0,26	0,58	1,34
AGB-AT_p44	V1	58,96	0,04	0,12	0,38	0,52
AGB-AT_p50	V1	49,21	0,62	0,00	0,12	0,98
AGB-AT_p53	V1	63,03	-0,18	0,00	0,3	0,56
AGB-AT_p54	V1	47,62	0,60	0,22	0,18	1,04
AGB-AT_p56	V1	52,99	0,16	0,14	0,1	0,7
AGB-AT_p61	V1	50,79	0,46	0,14	0,12	0,82
AGB-AT_p62	V1	53,25	0,32	0,18	0,14	0,72
AGB-AT_p65	V1	46,82	0,58	0,24	0,12	0,9
AGB-AT_p71	V1	49,43	0,56	0,14	0,38	1,02

13 Literaturverzeichnis

ATZ System Partners: [APIA]

APIA-Demonstrator von Continental Teves, 2003, Seite 30

Bäumler, Hans: [Reaktionszeiten im Straßenverkehr]

Reaktionszeiten im Straßenverkehr; VKU (Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik), Vieweg- Verlag, Ausgaben 11/2007, 12/2007, 1/2008

Bender, Eva: [PRORETA-Bremsassistent]

Darms. M.; Schorn, M.; Stählin, U.; Isermann, R.; Winner, H.: Antikollisionssystem PRORETA – Auf dem Weg zum unfallvermeidenden Fahrzeug, ATZ 04/2007

Bock, Th.: [Simulations- und Testumgebung für FAS]

K.-H. Siedersberger, M. Zavrel, A. Breu, M. Maurer: Simulations- und Testumgebung für Fahrerassistenzsysteme, VDI-Berichte Nr. 1900, 2005

Bubb, Heiner: [Fahrversuche mit Probanden-Nutzwert und Risiko]

Fahrversuche mit Probanden – Nutzwert und Risiko, Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12 Nr. 557, 2003

Burckhardt, M.: [Reaktionszeiten bei Notbremsvorgängen]

Reaktionszeiten bei Notbremsvorgängen; Fahrzeugtechnische Schriftreihe, Verlag TÜV Rheinland, 1985

Busch, Sebastian: [Bewertungsmethodik für FAS]

Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Prognose des Sicherheitsgewinns ausgewählter Fahrerassistenzsysteme, Dissertation, TU Dresden, 2004

Buttler, Fickel: [Statistik mit Stichproben]

Fickel, Norman: Statistik mit Stichproben, Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbek, 2002

Breuer, J.: [Fahrversuche mit Probanden]

Mücke, S.: Bewertung von Sicherheitssystemen in Fahrversuchen, Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, Darmstadt, 2007

Cheng, B.: [Mazda Fahrsimulator]

Analysis of driver response to collision warning during car following; Mazda Motor, Japan, JSAE Rev.: 23, 2002

Conti-Press: [Aktives Gaspedal]

Mit ContiGuard zum unfall- und verletzungsvermeidendem Auto, Pressemitteilung, Januar 2008

Daimler Chrysler: [Rettendes Rattern]

DaimlerChrysler AG, Hightechreport 2000: Rettendes Rattern, 2000

Destatis: [Unfallgeschehen 2006]

Vorndran, Ingeborg; Unfallgeschehen im Straßenverkehr 2006, Statistisches Bundesamt Wiesbaden, 2007

Dörner, K.: [FAS MAN]

Assistenzsysteme für Nutzfahrzeuge und deren Unfallvermeidungspotential, IAA-Symposium Entwicklungen im Fahrgutrecht und Sicherheit von Fahrgutfahrzeugen, 26.09.2006

Fastenmeier, W.: [Autofahrer und Verkehrssituation]

Autofahrer und Verkehrssituation: Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme, Schriftenreihe Mensch - Fahrzeug - Umwelt Band 33, Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1995

Färber, B.: [Bremsverhalten in Gefahrensituationen]

Schmitt, J.; Breu, A.; Maurer, M.: Simulation des Bremsverhaltens in Gefahrensituationen mittels experimentell validiertem Fahrermodell, VDI-Berichte 1515, 2007

Färber, Berthold: [Fahrerverhalten bei ANB]

Maurer, Markus; Nutzen und Nutzen-Parameter von Collision Warning und Collision Mitigation Systemen, Workshop Fahrerassistenzsysteme Walting, 2005

Fecher, N.: [Dissertation]

Analyse des stationären Folgeverhaltens von PKW-Fahrzeugführern unter Berücksichtigung von Nässe und einhergehender Sichtbehinderung“, Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 604, VDI-Verlag Düsseldorf, 2005

Fecher, N.: [FISITA]

K. Fuchs, J. Hoffmann, R. Bruder, H. Winner: Analysis of the driver behavior in autonomous emergency hazard braking situations, FISITA 2008, F2008-02-030

Fecher, N.: [ATZ]

K. Fuchs, J. Hoffmann, B. Abendroth, R. Bruder, H. Winner: Fahrerverhalten bei aktiver Gefahrenbremsung, Automobiltechnische Zeitschrift, 11/2008, in Vorbereitung

Fricke, N.: [Semantik von Warnmeldungen]

Zur Gestaltung der Semantik von Warnmeldungen, VDI-Berichte 1960, 2006

FVWS ISO Norm 15623.144.19 Road vehicles - Forward Vehicle Collision Warning System – Performance requirements and tests procedures, 2001

Gat, Itay: [SAE - mobileye]

Benady, Meny; Shashua, Amnon: A Monocular Vision Advance Warning System for the Automotive Aftermarket; SAE-2005-01-1470, 2005

Gaver, W.W.: [Ecological approach to auditory event perception]

How do we hear in the world? An ecological approach to auditory event perception, in: Ecological Psychology, 5 (4), 1993

Graab, B.: [AARU Verkehrsunfälle]

Donner, E.; Chiellino, U.; Hoppe, M.: Analyse von Verkehrsunfällen hinsichtlich unterschiedlicher Fahrerpopulation und daraus ableitbarer Ergebnisse für die Entwicklung adaptiver Fahrerassistenzsysteme, 3. Tagung aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme, Garching, April 2008

Graham, Robert: [Auditory Icons as emergency warnings]

Use of Auditory Icons as emergency warnings, Ergonomics, Vol. 42, No. 9, 1999

Gutberlet, K.-W.: [Allianz-Prognose]

Fahrerassistenzsysteme aus Sicht der Allianz und Einflüsse auf die Versicherungswirtschaft, 3. Tagung aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme, Garching, April 2008

HIGHTECHREPORT: [DaimlerChrysler]

Werkzeug von DaimlerChrysler, 1/2005, Seiten 56, 57

ISO/CD15006-1: Auditory information presentation

ISO/DIS15008-1: Visual presentation of information

Jansson, Jonas: [Dissertation Linköping]

Collision avoidance theory with applications to automotive collision mitigation, Dissertation nr. 950, Linköping University, Sweden, 2005.

Johanssen, Gunnar: [Informationsübertragungsprozesse]

Mensch-Maschine-Systeme, Springer-Verlag, 1993

Jürgensohn, Thomas: [Kraftfahrzeugführung]

Timpe, Klaus-Peter; Kraftfahrzeugführung, Springer, Berlin, 2001

Kassaagi, Mohamed: [PSA-Bremsassistent]

Bouslimi, W.; Val, C.; Bersac, J.; Moessinger, M.; Page, Y.; Laboratory of Accidentology, Biomechanics and studies of human behavior, PSA: Effectiveness of Emergency Brake Assist in Rear-End Accident Scenarios, FISITA 2006 (F2006D062)

Khanafer, Ali: [Benefits of ADAS]

Pusic, Danijel; Balzer, Dirk; Bernhard, Ulrich: Assessing the Benefits of Active Driver Assistance Systems, ATZelektronik 01/2008

Kiesewetter, W.: [Bremsassistent von Mercedes]

Klinker, W.; Steiner, M.: Der neue Brake Assist von Mercedes-Benz – aktive Fahrerunterstützung in Notsituationen, ATZ 1997

Klanner, F.: [Querverkehrsassistent]

Entwicklung eines kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten im Fahrzeug, Dissertation, Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt, 2008, in Vorbereitung

Knoll, Peter M.: [Predictive Safety System]

Schäfer, Bernd-Josef; Güttler, Hans; Bunse, Michael; Kallenbach, Rainer: Predictive Safety Systems – Steps Towards Collision Mitigation, SAE 2004-01-1111, 2004

Kodaka, Kenji: [Honda Rear-End Collision Velocity Reducing System]

Otabe, Makoto; Urai, Yoshihiro; Koike, Hiroyuki: Rear-End Collision Velocity Reducing System, SAE 2003-01-0503, März 2003

Kopischke, Stephan: [ANB]

Entwicklung einer Notbremsfunktion mit Rapid Prototyping Methoden, Dissertation, TU Braunschweig, 2000

König, W.: [Seminarunterlagen Fahrerassistenzsysteme]

Seminarunterlagen Fahrerassistenzsysteme, TU Darmstadt, 2003

Krause, Ralf: [Mensch und Bremse in Notbremssituationen]

Nils de Vries, Wolf-Christoph Friebe: Mensch und Bremse in Notbremssituationen; VKU (Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik), Ausgabe Juni 2007

Krüger, H.-P.: [Umgang mit Nebenaufgaben]

Rauch, N.; Gradenegger, B.: Der situationsbewusste Umgang mit Nebenaufgaben beim Fahren, VDI-Berichte 215, 2007

Krüger, H.: [Sehfunktion versus Sehleistung]

Sehfunktion versus Sehleistung bei Fahr- und Steuertätigkeiten, in: Fahr- und Steuertätigkeiten: Sehfunktionen, Fazit und Kurzzusammenfassung zum Seminar des Forum Arbeitsphysiologie anlässlich der Arbeitsmedizinischen Herbsttagung 1999 des Verbandes Deutscher Betriebs- und Werksärzte e.V., Nürnberg, 1999

LeBlanc, David J.: [Crash Alert Timing]

Kiefer, Raymond J.; Deering, Richard K.; Shulman, Michael A.; Palmer, Melvin, D.; Salinger, Jeremy: Forward Collision Warning: Preliminary Requirements for Crash Alert Timing, SAE 2001-01-0462, 2001

Leutzbach, W.: [Wahrnehmungsbedingungen]

Wahrnehmungsbedingungen und sicheres Verhalten im Straßenverkehr: Wahrnehmung in konkreten Verkehrssituationen, Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung, 177, 1988

Lerner, R.: [Warnmanagement im PKW]

Eckstein, L.; Müller, O.; Schumann, J.: Warn- und Informationsmanagement (WIM) im PKW: Zeitkritikalität, Fahrerleistung, Fahrsituation; VDI-Berichte Nr. 2015, 2007

Lucas, P.A.: [Communicative ability of Auditory Icons]

An evaluation of the communicative ability of Auditory Icons and Earcons, G. Kramer & S. Smith (Eds.), Proceedings of the Second International Conference on Auditory Display, 1994

Niemz, Tobias: [Reducing Braking Distance by Active Dampers]

Dissertation, VDI Reihe 12, Nr. 640, 2006

PReVENT: [Response-Checkliste]

Response-Checkliste, 2006, Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS, PReVENT 2006

Popper, Karl: [Logik der Forschung]

Logik der Forschung, Hrsg. von Herbert Keuth, Tübingen, 2005

Rasmussen, J.: [Human Errors]

Human Errors, Journal of Occupational Accidents, 1982

Rath, H.: [Active Safety]

Knechtges, J.: Effective Active Safety to Reduce Road Accidents; SAE technical paper series, 1995

Statistik des Gesamtverbands der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., 2001

Sheridan, T.B.: [General Model]

Toward a general model of supervisory control, Monitoring Behaviour and Supervisory Control, New York, 1976

Shutko, John: [Virginia Tech Collision Avoidance]

An Investigation of Collision Avoidance Warnings on Brake Response Times of Commercial Motor Vehicle Drivers, Master's thesis, Virginia-Tech, Blacksburg, 1999

Schmitt, J.: [Bremsverhalten in Gefahrensituationen]

Breu, A.; Maurer, M.; Färber, B.: Simulation des Bremsverhaltens in Gefahrensituationen mittels experimentell validiertem Fahrermodell, VDI-Berichte Nr. 2015, 2007, S. 78

Schmidt, Robert.: [Physiologie des Menschen]

Thews, Gerhard; Lang, Florian: Physiologie des Menschen Springer, Berlin, 2000

Steiner, M.: [ATZ - Die neue S-Klasse]

Baumann, M.; Regensburger, U.; Schmid, V.; Hämmerling, C.; Seekircher, J.; Reichmann, M.; Kiesewetter, W.: Fahrdynamikregelsystem und Fahrerassistenzsysteme, ATZ / MTZ Sonderheft: Die neue S-Klasse von Mercedes-Benz, 2005

Toyota Deutschland GmbH: [Lexus PCS im LS 460]

Pressemitteilung Lexus: Lexus Pre-Crash-Safety (PCS) im LS 460, November 2006

Tränkle, Ulrich: [Autofahren im Alter]

Autofahren im Alter, in: Schriftenreihe Mensch-Fahrzeug-Umwelt, Band 30, TÜV-Rheinland Verlag Köln, Deutscher Psychologen-Verlag Bonn, 1994

Uebel, A.: [Abstandsverhalten auf Autobahnen]

Analyse der Abstand- und Geschwindigkeitsprofile auf der Bundesautobahn, Diplomarbeit, Universität der Bundeswehr, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, 2003

Ulfvengren, Pernilla: [A comparison of sounds in a cognitive approach to auditory alert design]: Associability: A comparison of sounds in a cognitive approach to auditory alert design in: Human Factors and Aerospace Safety, 3 (4)

VDI 2222, 1996 und VDI 2225, 1977, www.vdi.de

Von Ratingen, Michiel: [Next Euro NCAP]

The Next Mile, Vortrag carhs Safety Update, Aschaffenburg, April 2008

Vollrath, M.: [Anforderungen an FAS]

Briest, S.; Schießl, C.; Drews, J.; Becker, U.: Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme aus Sicht der Verkehrssicherheit (F60), 2006

Volvo-Presse: [Aktives Geschwindigkeits- und Abstandsregelsystem]

Volvo mit aktivem Geschwindigkeits- und Abstandregelsystem inklusive Bremsassistent Pro, Volvo-Presse, 22.02.2007

Weiß, Jochen: [Bremsassistent]

Beitrag zur Entwicklung eines optimierten Bremsassistenten, Dissertation am Institut für Arbeitswissenschaft der TU Darmstadt, ergonomia-Verlag, 2003

Wiacek, Christopher J.: [Characteristics in Rear-End-Crashes]

Najm, Wassim G.: Driver/Vehicle Characteristics in Rear-End Precrash Scenarios Based on the General Estimates System (GES); SAE-1999-01-0817, 1999

Wickens, Christopher: [Engineering Psychology]

Columbus; Merrill; Engineering Psychology and Human Performance, Verlag Upper Saddle River, 1984

Winner, H.: [MuF]

Landau, Kurt: Fahrversuche mit Probanden-Nutzwert und Risiko, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12 Nr. 557, 2003, Vorwort

Winner, H.: [Handbuch FAS]

Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Viewg-Verlag, erscheint 2009

Wolkenstein, Peter: [ATZ- Q7]

Der neue Audi Q7, ATZ 11/2005

Zomotor, A.: [Fahrerverhalten]

Fahrwerktechnik - Fahrverhalten; Würzburg, Vogel-Verlag, 1987

Lebenslauf

Jens Hoffmann
Ludwig-Büchner-Str. 11
64285 Darmstadt

- Persönliche Daten

Geburtsdatum:	18. Juli 1979
Geburtsort	Witten

- Berufliche Tätigkeit

2005 – 2008	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt
-------------	--

- Universitäre Ausbildung

2004	Abschluss als Dipl.-Ing., Diplomarbeit am Fachgebiet Fahrzeugtechnik
2002 – 2003	Auslandsstudium an der Ecole Nationale Supérieure d’Hydraulique et Mécanique de Grenoble, Frankreich
1999 – 2004	Allgemeiner Maschinenbau, TU Darmstadt

- Schulische Ausbildung

1999	Abitur
1990 – 1999	Ruhr-Gymnasium Witten